Contribuição para o estudo da aderência entre polímeros e betão

J. L. BARROSO DE AGUIAR

Dissertação apresentada a provas de doutoramento em Engenharia Civil (especialidade Materiais de Construção)

UNIVERSIDADE DO MINHO
Braga
1990

Agradecimentos

O autor deseja expressar o seu agradecimento às seguintes entidades e pessoas, sem o concurso das quais não teria sido possível concretizar o presente trabalho:

— Ao Prof. Barreiros Martins, Professor Catedrático da Universidade do Minho que me orientou desde o início e nunca cessou de me aconselhar e facilitar o desenrolar dos meus trabalhos a todos os níveis;

— Ao "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" na pessoa do seu Director, Dr. J. C. Parriaud que me permitiu a realização de ensaios e as estadias para preparação do presente trabalho;

— À Dra. A. - M. Paillére, Chefe da Secção de "Pathologie et Amélioration des Matériaux", no seio da qual se efectuaram os trabalhos;

— Aos Profs. Joaquim Sampaio e Torres Marques da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Dr. Arlindo Gonçalves do Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelos conselhos que me deram e pelo tempo que me consagraram;

— Aos Drs. D. Maugis, J. - N. Theillout e M. - C. Reymond do "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" pelo apoio que me concederam e pelo tempo que me consagraram;

— Ao Eng. J. J. Serrano pelo auxílio prestado na organização material dos ensaios efectuados em França;

— Ao Sr. Domingos pelos cuidados postos na dactilografia;

— À Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, à Embaixada Francesa em Portugal e ao Instituto Nacional de Investigação Científica pelos apoios financeiros que me concederam.

Que todas as pessoas que me ajudaram encontrem aqui a expressão do meu mais profundo reconhecimento e os meus maiores agradecimentos.

Índice do texto

Pág.

Introdução 1

Capítulo 1 - Aplicação dos polímeros como material de construção 5

1.1 Introdução 5
1.2 Classificação dos polímeros 5
1.3 Fabrico dos polímeros 8
1.4 Propriedades dos polímeros 14
1.5 Aplicações dos polímeros 17
1.5.1 Revestimento de pavimentos 17
1.5.2 Acabamento interior de paredes 18
1.5.3 Canalizações 18
1.5.4 Artigos sanitários 19
1.5.5 Colas e mastiques 19
1.5.6 Outras aplicações 22
1.6 Normalização 22

Capítulo 2 - Reparações e colagens de betões com epóxidos 31

2.1 Introdução 31
2.2 Aderência 32
2.3 Epóxidos 38
2.4 Propriedades dos epóxidos 40
2.5 Reparações externas 43
2.5.1 Produtos a utilizar 43
2.5.2 Condições de utilização dos produtos 43
2.5.2.1 Revestimentos superficiais de espessura inferior a $2\,cm$. 43
2.5.2.1.1 Preparação das superfícies a reparar 43
2.5.2.1.2 Camada de aderência em epóxido 58
2.5.2.1.3 Argamassa ou betão de epóxido 61

Pág.
2.5.2.1.4 Segurança do pessoal 63
2.5.2.2 Revestimentos superficiais de espessura superior ou igual a $2\,cm$ 64
2.6 Reparações internas 64
2.6.1 Produtos a utilizar 64
2.6.2 Condições de utilização 68
2.7 Colagens 72
2.8 Controlo de qualidade 72

Capítulo 3 - Elementos de mecânica da fractura 83

3.1 Introdução 83
3.2 Modos de rotura 83
3.3 Mecânica da fractura linear 88
3.3.1 Concentração de tensões 88
3.3.2 Método de Westergaard 89
3.3.3 Método de Muskhélichvili 90
3.3.4 Factor de intensidade de tensão 90
3.3.5 Tenacidade à fractura 93
3.3.6 Teoria de Griffith 98
3.3.7 Propagação subcrítica 101
3.3.8 Teoria de Barenblatt 109
3.3.9 Método da complacência 110
3.3.10 Equivalência entre as teorias energéticas e os factores de intensidade de tensão 111
3.4 Integral J de Rice 111
3.5 Estudo da zona plástica na frente de fissura 112
3.5.1 Dimensão da zona plástica 113
3.5.2 Forma da zona plástica na frente de fissura 114

Capítulo 4 - Métodos numéricos aplicados à mecânica da fractura 117

4.1 Introdução 117
4.2 O método dos elementos finitos 118
4.2.1 Princípio e história 118
4.2.2 Discretização 118
4.2.3 Escolha das funções de interpolação 120

Pág.

4.2.3.1 Funções de deslocamento 120
4.2.3.2 Funções de interpolação 120
4.2.4 Integração das equações elementares 121
4.2.5 União dos elementos 123
4.3 O método dos elementos fronteira 124
4.3.1 Introdução 124
4.3.2 Fórmulas gerais 125
4.3.3 Equações integrais de base 126
4.3.4 Resolução numérica 127
4.4 Aplicação ao estudo da mecânica da fractura linear 127

Capítulo 5 - Aplicação da mecânica da fractura ao betão 137

5.1 Generalidades 137
5.2 Mecanismos de fissuração do betão 139
5.3 Condições de aplicação da mecânica da fractura linear ao betão 142

Capítulo 6 - Aplicação da mecânica da fractura ao estudo da aderência 155

6.1 Introdução 155
6.2 Condições de aplicação da mecânica da fractura linear à aderência 156
6.3 Aderência entre materiais metálicos e sistemas epóxido ... 172

Capítulo 7 - Comportamento mecânico das ligações por colagem entre polímeros e betão 177

7.1 Introdução 177
7.2 Formulação dos polímeros 178
7.2.1 Escolha do tipo de polímero 178
7.2.2 Epóxidos 178
7.2.2.1 Propriedades 178
7.2.2.2 Definição dos componentes 180
7.2.2.2.1 Epóxido puro 180
7.2.2.2.2 As cargas minerais 182

Pág.
7.2.2.3 Cinética de polimerização 183
7.2.2.4 Quantidade máxima de carga incorporável aos polímeros puros 186
7.2.2.4.1 Introdução 186
7.2.2.4.2 Técnica do ensaio 187
7.2.2.4.3 Resultados 187
7.2.2.5 Influência da carga mineral no comportamento do polímero 190
7.2.2.5.1 Técnica do ensaio 190
7.2.2.5.2 Resultados 191
7.2.2.6 Influência da quantidade de água absorvida na resistência à tracção 193
7.3 Avaliação da resistência das ligações betão / epóxido com ensaios de tracção directa 194
7.3.1 Introdução 194
7.3.2 Escolha do ensaio 196
7.3.3 Técnicas de ensaio 197
7.3.3.1 Preparação da superfície 197
7.3.3.2 Processo de colagem 198
7.3.3.3 Ensaio de tracção directa 198
7.3.4 Série de ensaios nº 1 200
7.3.5 Série de ensaios nº 2 200
7.3.6 Série de ensaios nº 3 205
7.3.7 Modos de rotura 213
7.3.8 Resultados 213
7.3.8.1 Série de ensaios nº 1 213
7.3.8.2 Série de ensaios nº 2 217
7.3.8.3 Série de ensaios nº 3 220
7.4 Avaliação da resistência das ligações betão/epóxido com ensaios da mecânica da fractura 221
7.4.1 Introdução 221
7.4.2 Técnicas de ensaio 223
7.4.2.1 Os materiais 223
7.4.2.2 Fabricação dos provetes 223
7.4.2.3 Processo de união 225
7.4.2.4 Caminho de fissura e reforço 226
7.4.2.5 O ensaio 229
7.4.3 Avaliação do comprimento das fissuras 231

Pág.
7.4.3.1 Introdução 231
7.4.3.2 Emissão acústica 231
7.4.3.3 Deflectómetro 235
7.4.3.4 Complacência dos provetes 236
7.4.4 Resultados 240
7.4.4.1 Série de ensaios nº 1 240
7.4.4.2 Série de ensaios nº 2 250

Conclusão 255

Referências 257

Anexo 1 Curvas granulométricas das cargas calcárias 269
Anexo 2 Curvas granulométricas das cargas siliciosas 273
Anexo 3 Estudos com programa de elementos finitos 277
Anexo 3.1 Malha de elementos finitos 279
Anexo 3.2 Argamassa + cola $a = 3,0\,cm$ 299
Anexo 3.3 Argamassa $a = 3,0\,cm$ 311
Anexo 3.4 Argamassa $a = 10,5\,cm$ 327
Anexo 3.5 Argamassa + cola $a = 10,5\,cm$ 345
Anexo 3.6 Argamassa + cola $a = 25,5\,cm$ 361
Anexo 3.7 Argamassa $a = 25,5\,cm$ 379
Anexo 4 Curvas $P - \delta$ obtidas nos ensaios com provetes tipo DCB - Série de ensaios nº 1 399
Anexo 5 Curvas $P - \delta$ obtidas nos ensaios com provetes tipo DCB - Série de ensaios nº 2 411

Índice de figuras

Fig.		Pág.
1.1	Cobertura com placas acrílicas obtidas por termoformação	12
1.2	Elementos da construção fabricados com materiais poliméricos	22
2.1	Ângulo de contacto	33
2.2	Variação do ângulo de contacto com a tensão superficial	34
2.3	Curvas de energia potencial de tipos diferentes de forças interatómicas: a) ligação covalente; b) ligação hidrogénio; c) ligação de Van der Waals	36
2.4	Esquematização de ligações intra e intermoleculares	39
2.5	Duração prática de utilização	40
2.6	Evolução da temperatura da mistura em função do tempo	42
2.7	Aplainamento	55
2.8	Com martelo pneumático	55
2.9	Por jacto de areia	56
2.10	Por jacto de água sob forte pressão	56
2.11	Eliminação da ferrugem com escova metálica	57
2.12	Desempoeiramento por aspiração	57
2.13	O aquecimento da base deve fazer-se em banho-maria	59
2.14	Misturador para epóxidos com capacidade de 70 litros	62
2.15	Equipamento de protecção a utilizar na aplicação de um epóxido à pistola	63
2.16	Limpeza de uma fissura com jacto de ar comprimido	69
2.17	Colocação de tubos injectores	70
2.18	Ligação do cartucho ao tubo injector	71
2.19	Remoção do epóxido selante com rebarbadora	71
2.20	Esquema do ensaio	73
2.21	Forma dos provetes	74
2.22	Configuração do ensaio de corte directo	75
2.23	Dimensões (mm) do provete cilíndrico	76
2.24	Provete reconstituido	76
2.25	Forma e constituição da armadura da viga em betão armado	77
2.26	Ciclos de gelo-degelo	78
2.27	Posicionamento dos provetes	78

Fig. Pág.
2.28 Ciclos de choque térmico 79
2.29 Posicionamento dos provetes 79
2.30 Ciclo térmico 80
2.31 Esquema do aparelho 80
3.1 Fissura em corte 84
3.2 Modos de rotura 84
3.3 Frente de fissura 85
3.4 Curvas carga - deformação características da rotura frágil (a) e da rotura dúctil (b) 86
3.5 Curvas carga - deformação de um material viscoelástico 87
3.6 Placa de dimensões infinitas com fissura elíptica, submetida à tracção ... 88
3.7 Deformada da frente de fissura 89
3.8 Sistema de eixos cartesiano na frente de fissura 91
3.9 Flexão três pontos 93
3.10 Provete de tracção 94
3.11 Valor crítico de k_I 95
3.12 Distribuição de tensões na frente de fissura 96
3.13 Curvas de solicitação (.....) e curva intrínseca de Mandel (- - - - -) 97
3.14 Propagação da fissura a carga constante (a) e a afastamento constante (b) 99
3.15 Equilíbrio estável 100
3.16 Equilíbrio instável 100
3.17 Teor de restituição de energia em função da velocidade de propagação e da humidade relativa 101
3.18 Sobreposição da curva característica da rotura frágil (I) e da curva das perdas internas de velocidade (II) 103
3.19 Variação da taxa de libertação de energia de deformação com a velocidade de propagação da fissura 103
3.20 Provete DCB com propagação a força constante 104
3.21 Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação a força constante 105
3.22 Provete DCB com propagação com afastamento constante 105
3.23 Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação com afastamento constante 106
3.24 Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação da fissura a velocidade de afastamento constante 107

Fig.		Pág.
3.25	Taxa de libertação da energia de deformação em função da velocidade de propagação e da humidade ambiente	108
3.26	Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação quando a rotura se dá num líquido	108
3.27	Forma da fissura	109
3.28	Variação das forças de coesão interatómica com o afastamento das partículas	109
3.29	Frente de fissura	112
3.30	Variação de tensões e dimensão da zona plástica na frente de fissura	113
3.31	Dimensões da zona plástica e distribuição de tensões numa laje solicitada por uma tensão uniforme σ	114
3.32	Forma da zona plástica dada pelos critérios de Tresca e de Von Mises	115
3.33	Forma das zonas plásticas à superfície do provete e no seu centro	115
4.1	Discretização de um sólido	119
4.2	Divisão da fronteira em S_u e S_t	124
4.3	Elemento triangular com singularidade no nó 1	128
4.4	Elementos quadrangulares isoparamétricos com nós médios deslocados	129
4.5	Elemento triangular com nós médios deslocados	131
5.1	Curvas tensão-extensão em compressão de um inerte, do cimento e do betão	139
5.2	Curva tensão-extensão do betão mostrando as diferentes zonas de propagação de fissuras	140
5.3	Modelo simples para estudo do betão	141
5.4	Representação esquemática de um poro cilíndrico com entalhes num material poroso	142
5.5	Resultado de um cálculo bidimensional. A carga cresce da esquerda para a direita	143
5.6	Representação esquemática de uma fissura na interface atravessando a matriz antes de encontrar uma nova inclusão	144
5.7	Formação de fissuras segundo um cálculo em que k_{IC} (inertes) $\gg k_{IC}$ (matriz)	145
5.8	Formação de fissuras segundo um cálcuo em que k_{IC} (inertes) $\simeq k_{IC}$ (matriz)	146
5.9	Provete do tipo "compact-tension" (C.T.)	148
5.10	Tracção concentrada	149
5.11	Modelo da fissura fictícia	151
5.12	Influência da geometria do provete sobre o valor de k_{IC} determinado	152
6.1	Provete tipo DCB	156

Fig.		Pág.
6.2	Deformada do provete na interface	157
6.3	Influência da relação entre módulos de elasticidade sobre o factor de intensidade de tensão	158
6.4	Influência da relação de módulos de elasticidade longitudinal na tensão σ_{yy} na proximidade da frente de fissura	160
6.5	Influência da relação de módulos de elasticidade longitudinal na tensão σ_y ao longo do eixo dos yy	161
6.6	Influência da espessura da junta no factor de intensidade de tensão para provetes DCB com diferentes relações de módulos de elasticidade longitudinal	162
6.7	Influência da espessura da junta sobre a tensão σ_{yy} ao longo do eixo dos xx	163
6.8	Influência da espessura da junta sobre a tensão σ_{yy} ao longo do eixo dos yy	164
6.9	Afastamento de σ_{yy} do comportamento singular numa região próxima da frente de fissura	165
6.10	Variação de σ_{yy} quando nos afastamos da frente de fissura	166
6.11	Tensão σ_{yy} ao longo de rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$	167
6.12	Tensão σ_{xx} ao longo de linhas rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$	168
6.13	Tensão σ_{xy} ao longo de linhas rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$	169
6.14	Tensão σ_{yy} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$	170
6.15	Tensão σ_{xx} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$	170
6.16	Tensão σ_{xy} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$	171
6.17	Provete DCB com altura constante	173
6.18	Provete DCB com altura variável	174
6.19	Provete tipo $D.C.B.$	174
7.1	Ângulo de contacto em função da dosagem de diluente, endurecedor e carga mineral [11]	179
7.2	Curvas esforços-deformações dos sistemas epóxido	180
7.3	Variação do módulo de elasticidade na origem em função das dosagens em diluente e em carga mineral	181
7.4	Cargas calcárias	184
7.5	Cargas siliciosas	184
7.6	Cargas calcárias	185
7.7	Cargas siliciosas	185

Fig. Pág.
7.8 Quantidade máxima de carga incorporável nos dois tipos de resinas de epóxido em função da superfície específica da carga 189
7.9 Dimensões dos provetes 190
7.10 Resistência à tracção em função da dosagem de carga 191
7.11 Quantidade de água absorvida em função do tempo de contacto com a água e do tempo de trabalho 192
7.12 Resistência à tracção em função da quantidade de água absorvida 193
7.13 Diferentes tipos de rotura de uma junta topo a topo betão/adesivo ... 195
7.14 Provete cilíndrico betão/cola/betão 196
7.15 Superfície escovada antes da colagem 197
7.16 Colagem dos prismas 198
7.17 Prisma carotado e um dos provetes já com a altura de 16 cm 199
7.18 Colagem das cabeças de amarração 199
7.19 Principais tipos de rotura dos provetes betão-cola-betão 213
7.20 Aderência en função da percentagem de carga 214
7.21 Aderência em função da percentagem de carga 215
7.22 Tensões de rotura máximas em função da dosagem de carga 216
7.23 Aderência em função da espessura da junta 218
7.24 Aderência em função da espessura da junta 219
7.25 Aderência em função da dosagem de carga - Epóxido X 220
7.26 Aderência em função da dosagem de carga - Epóxido Y 221
7.27 Dimensões do provete tipo DCB 224
7.28 Provete DCB em argamassa 224
7.29 Meio-provete após serragem 225
7.30 Provete reconstituido 226
7.31 Caminho de fissura e reforço dos provetes 227
7.32 Provete de argamassa + cola reforçado 227
7.33 Rotura de provete não reforçado 228
7.34 Provete com peças de adaptação à máquina de tracção 228
7.35 Máquina de tracção "Zwick" 230
7.36 Aspecto geral da máquina de tracção 231
7.37 Ondas de emissão acústica. Técnicas de contagem. 14 alternâncias; 2 acontecimentos. 232
7.38 Sistema de localização de fonte de emissão acústica em duas dimensões 233
7.39 Disposição dos receptores de emissão acústica 234
7.40 Deflectómetro a meio do caminho da fissura 235
7.41 Posição dos diversos materiais que constituem os provetes 236

Fig. Pág.
7.42 Variação da complacência dos provetes com o comprimento da fissura . 238
7.43 Variação da taxa crítica de libertação da energia de deformação com a velocidade do ensaio 254

Simbologia

Embora os símbolos utilizados no presente trabalho sejam definidos ao longo do texto, à medida que vão aparecendo, afigura-se com interesse apresentar uma listagem dos mais importantes:

A - matriz do conjunto de parâmetros

$\mathcal{A}$ - área sob a curva carga-deslocamento

a - coeficiente da expressão que relaciona a tensão superficial com o ângulo de contacto

a - metade do eixo maior da elipse

a - areia

a - comprimento da fissura

a_i - conjunto de parâmetros

a_T - factor de translação

B - matriz que faz intervir as derivadas parciais

B - espessura do provete

B_0 - espessura característica do provete

b - coeficiente da expressão que relaciona a tensão superficial com o ângulo de contacto

b - metade do eixo menor da elipse

b - espessura do provete tipo DCB

C - Complacência

C - carbono

c - cimento

D - matriz de elasticidade

d - diâmetro do cilindro em aço

dS - área da nova fissura

dw_{cin} - variação de energia cinética

dw_{elast} - variação de energia elástica

dw_{ext} - variação de energia potencial

dw_s - energia dissipada para formação da fissura

dw_{tot} - variação da energia total do sistema

E - módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young

E' - parte real do módulo complexo

E'' - parte imaginária do módulo complexo

e_j - vector de base

F - carga aplicada

F_E - matriz das forças nodais do elemento E

F_G - matriz global das forças nodais

f_i - base de funções

f_i - forças volúmicas

G - módulo de corte

G - taxa de libertação da energia de deformação

G_0 - taxa de libertação da energia de deformação a velocidade nula

G_c - taxa crítica de libertação da energia de deformação

G_{IC} - taxa crítica de libertação da energia de deformação em modo I

g - inertes grossos

H - hidrogénio

h - metade da altura do provete tipo DCB

I - momento de inércia

$I_m(Z')$ - parte imaginária de Z'

J - integral de Rice

K - módulo de coesão

k - rigidez do provete

K - factor de intensidade de tensão

K_I - factor de intensidade de tensão em modo I

K_{IC} - tenacidade

K_{II} - factor de intensidade de tensão em modo II

K_{III} - factor de intensidade de tensão em modo III

K_m - rigidez da máquina de tracção

K_{pc} - factor crítico de intensidade de tensão na pasta de cimento

L_1 - comprimento do lado 1

L_2 - comprimento do lado 2

ℓ - comprimento

M - número total de nós da fronteira

N - funções de interpolação

n - número de ciclos

n_j - normal exterior às faces da fissura

P - carga aplicada

P_k - matriz que permite relacionar os deslocamentos dos nós do elemento k com a matriz global dos deslocamentos nodais

P_n - coordenadas do centro de gravidade

Q_i - forças generalizadas

Q_m - coordenadas do centro de gravidade

q_i - deslocamentos generalizados

R_D - comprimento da zona plástica

R_E - matriz de rigidez do elemento

$R_e(Z)$ - parte real de Z

R_G - matriz de rigidez global

R_p - metade do comprimento da zona plástica

R_t - resistência à tracção

r - distância actuante

r - coordenada polar

S - superfície da fissura

S - enxofre

S^+ - face superior da fissura

S^- - face inferior da fissura

s - profundidade da carotagem

T - temperatura

T_g - temperatura de solidificação

T_i - vector tensão

T_S - temperatura de referência

t - espessura da junta adesiva

t_c - espessura do suporte

t_o - espessura do revestimento

t_p - espessura do cilindro em aço

U_E - matriz dos deslocamentos nodais do elemento E

U_E^* - deslocamento virtual

U_G - matriz global dos deslocamentos nodais

u - deslocamento segundo x

$[u_i]$ - vector deslocamento

u_i^+ - deslocamento relativo à face superior

u_i^- - deslocamento relativo à face inferior

u_n - abertura da fissura

V - viscosidade

v - deslocamento segundo y

v - velocidade de propagação da fissura

v_c - velocidade crítica de propagação da fissura

x_i - coordenadas do ponto x

Z - função analítica da variável complexa

Z' - primeira derivada da função da variável complexa

z - variável complexa

w - deslocamento segundo z

w - densidade de energia elástica

$w-$ água

α - parâmetro que faz intervir a geometria do provete

γ - energia superficial

Δ - desvio padrão

Λ - afastamento dos pratos da máquina

δ - afastamento no provete

δ_{ij} - símbolo de Kronecker

Σ - somatório

ε - extensão

ε_{ij} - tensor das deformações

ε_x - extensão na direcção do eixo dos xx

Θ - ângulo de contacto

θ - coordenada polar

λ - coeficiente de Lamé

μ - coeficiente de Lamé

υ - coeficiente de Poisson

η - coordenada local

σ - tensão

υ - tensão superficial

σ_{ij} - tensor das tensões

σ_0 - limite de elasticidade

σ_x - tensão segundo o eixo dos xx

σ_y - tensão segundo o eixo dos yy

σ_z - tensão segundo o eixo dos zz

σ_θ - tensão segundo uma direcção θ

ρ - raio de curvatura da elipse

$\tau_{r,\theta}$ - tensão de corte

ξ - coordenada local

ϕ - função de tensão biharmónica

$\phi(z)$ - função analítica da variável complexa z

$\psi(z)$ - função analítica da variável complexa z

∂ - derivada parcial

$\bigtriangledown$ - operador laplaciano

Introdução

O aparecimento de materiais poliméricos no domínio da construção fez, destes, um processo de ligação original e susceptível de proporcionar trabalhos interessantes, embora o seu custo seja elevado.

De entre os polímeros com propriedades aderentes escolhemos os epóxidos porque, como veremos adiante, são os que melhor se adaptam ao material betão.

Os epóxidos utilizam-se em trabalhos de reparação de estruturas de betão (injecções e outras colagens), em juntas de betonagem e na ligação de elementos prefabricados, como na construção de pontes, silos e coberturas.

O nosso trabalho de investigação enquadra-se no âmbito geral das técnicas de ligação por colagem do betão prefabricado e no domínio das juntas de betonagem.

A prática e a evolução destas técnicas deve muito ao empirismo que tem origem em duas razões principais. Por um lado, a complexidade do fenómeno da aderência entre um material rígido e uma cola elástica e por outro lado a grande diversidade de colas e os diferentes estados de superfície (rugosidade, humidade, etc.) em que se pode encontrar o betão.

Uma colagem tem duas funções principais:

- ligar da melhor forma possível os elementos da construção;
- transmitir os esforços de um elemento ao outro.

O preenchimento destas duas funções é condicionado pela boa qualidade da colagem. Para isto, é necessário tomar em consideração parâmetros relativos quer ao adesivo, quer ao aderente:

- a natureza, a composição e as propriedades físico-químicas do adesivo;
- a natureza do aderente e o seu estado de superfície;
- o meio em que se realiza a colagem;
- o dimensionamento da espessura da junta de colagem;
- a técnica utilizada para a colagem.

Com este estudo pretendemos dar uma contribuição para o estudo da aderência entre polímeros e betão.

O nosso estudo das ligações por colagem entre betão e polímeros, tem por finalidade a obtenção de algumas respostas para as perguntas que, actualmente, se colocam. Numerosos estudos comprovam a qualidade da aderência, mas sem, na

maior parte dos casos, procurarem as razões pelas quais este ou aquele produto adere bem ou mal ao betão. Isto conduz à existência de incertezas que importa conhecer para que se possam efectuar boas colagens.

Pela nossa parte, interessamo-nos por estudar a influência da natureza, quantidade e granulometria das cargas introduzidas no epóxido sobre a aderência. Estudamos, também, a influência da espessura da junta adesiva.

O estudo experimental foi inicialmente orientado para os domínios da mecânica tradicional. Por isso, se efectuaram ensaios de tracção directa. Numa fase posterior quisemos aprofundar o estudo da aderência e utilizamos os princípios da mecânica da fractura.

O problema que se coloca é como prever a evolução dos defeitos (fissuras) presentes no betão ou na interface epóxido betão para melhor os controlar. A mecânica da fractura, ciência relativamente nova, estuda o comportamento dos meios fissurados baseando-se na mecânica dos sólidos. A mecânica da fractura permite a caracterização de um meio fissurado relacionando-o com a sua rotura, propondo modelos de cálculo da extensão da zona "perturbada" pelas fissuras (zona plástica para os metais, zona microfissurada para o betão). Esta ciência permite assim a previsão, para um material de características dadas (lei de comportamento, resistência, ...) e para uma configuração geométrica dada do meio e da fissura, do limite máximo da carga a partir do qual a fissura se vai propagar. Esta ciência apresenta-se como uma ferramenta particularmente bem adaptada à determinação quantitativa das condições de propagação das fissuras e da rotura.

O capítulo I tem por finalidade apresentar os polímeros como material de construção. São referidas a sua classificação, processos de fabrico, propriedades e aplicações. A justificação para a inclusão deste capítulo tem a ver com a pouca divulgação dos polímeros como material de construção.

No capítulo II tratamos das reparações e colagens de betões com epóxidos. Para além de um estudo teórico sobre a aderência, apresentamos os epóxidos e referimos aspectos práticos relativos a reparações externas e internas (injecção de fissuras).

O capítulo III destina-se a colocar-nos a par da mecânica da fractura. Apresentam-se as várias definições relativas a esta ciência e as diferentes teorias que ela comporta.

Em virtude de termos utilizado o método dos elementos finitos para auxiliar no cálculo do comprimento da fissura em cada instante, achamos por bem inserir um capítulo, o IV, sobre os métodos numéricos aplicados à mecânica da fractura. São abordados o método dos elementos finitos e o método dos elementos fronteira.

O capítulo V é dedicado a um estudo bibliográfico sobre os trabalhos já efectuados relativos à fissuração do betão e à aplicação da mecânica da fractura ao betão.

No capítulo VI apresenta-se um estudo bibliográfico sobre a aplicação da mecânica da fractura ao estudo da aderência. Apresentam-se resultados e conclusões de trabalhos já efectuados sobre o tema.

No último capítulo apresenta-se o trabalho experimental efectuado e a sua discussão. Em primeiro lugar justifica-se a escolha dos materiais utilizados. Em seguida apresentam-se as técnicas de ensaio. Efectuaram-se, primeiramente, ensaios de tracção directa e posteriormente ensaios baseados na mecânica da fractura.

Por fim apresentam-se as conclusões e as vias para estudo futuro.

Capítulo 1

Aplicação dos polímeros como material de construção

1.1 Introdução

Os polímeros desempenham um papel de importância crescente na construção civil, quer quantitativa quer qualitativamente.

Durante milhares de anos e até ao fim do século XIX o homem utilizou sobretudo substâncias naturais que satisfaziam quase todas as suas necessidades. Algumas das substâncias utilizadas foram: algodão e lã (vestuário), óleos e amido (alimentação), madeiras e pedras (habitação).

A história dos materiais poliméricos inicia-se em 1870 com o celulóide (nitrato de celulose) [1]. Até 1900, o celulóide foi a única matéria plástica produzida industrialmente. Seguidamente apareceu a galalite e, em 1907, o belga Backeland lançou no mercado a primeira resina de síntese à qual associou o seu nome baquelite. Utiliza-se, ainda hoje como suporte em aparelhagem electrónica. A partir dessa altura novas matérias plásticas foram aparecendo a um ritmo acelerado: acetato de celulose (que agora constitui uma das matérias primas clássicas em armações de óculos, brinquedos, volantes de automóveis, etc.), resinas polissintéticas, polietileno e poliamida (das primeiras marcas comeciais salienta-se o nylon) [2]. O Quadro 1.1 obtido de [1], indica por ordem de datas o aparecimento dos primeiros materiais poliméricos.

1.2 Classificação dos polímeros

Uma das classificações dos polímeros mais utilizada é a que os ordena de acordo com a sua estrutura e sistema de ligação.

QUADRO 1.1

Família	Primeiras marcas ou designação	Inventor	Ano aproximado de lançamento	País de origem
Nitrato de celulose	Celuloide	Irmãos Hyatt	1870	EUA
Galalite			1889	Alemanha
Acetato de celulose			1905	Alemanha
Fenoplástico	Bakelite	Brakeland	1909	EUA
Celulose regenerada	Celofane	Brandenberger	1915	França
Polimetacrilato de metilo	Plixiglas	Wulff	1927	Alemanha
Aminoplastico	Pollopas	Pollak	1928	EUA
Poliestireno		Staudinger	1930	Alemanha
Policloreto de vinilo		Ostromysianski Klatte	1931	Alemanha
Polietileno	Baixa densidade alta pressão		1937	Inglaterra
Polivinilideno	Saram		1940	EUA
Poliamida 6	Nylon	Carothers	1941	EUA
Silicone			1941	EUA
Poliester	(resinas)		1942	EUA
Polifluoretos	Teflon		1943	EUA
ABS		Daly	1946	EUA
Poliamida 11	Rilsan	Zeiner e Genas	1946	França
Epóxido	Araldite	Castan	1947	Suiça
Poliuretano	Moltopren	Otto Bayer	1950	RFA
Poliestireno expandido	Styropor		1951	RFA
Acetal	Delrin		1953	EUA
Polietileno alta densidade	Alta densidade Baixa pressão	Ziegler	1955	RFA
Polipropileno		Natta	1957	Itália
Policarbonato	Makrolon		1957	RFA EUA

Assim, podem distinguir-se dois grandes grupos: termoendurecíveis e termoplásticos.

Os termoendurecíveis são aqueles que no processo de fabrico solidificam numa massa formando um corpo sólido e estável que não poderá voltar a amolecer. Estes polímeros não podem, portanto, ser novamente transformados.

A obtenção dos polímeros termoendurecíveis tem lugar, na maioria dos casos através de reacções diferentes, segundo o tipo de resina, sob a acção conjunta de catalisadores, produtos endurecedores, aceleradores e transmissores de calor. A resina ou base é a substância predominante e a que confere ao polímero as suas propriedades fundamentais.

Por vezes adicionam-se à resina produtos chamados cargas com o objectivo de modificar determinadas propriedades. Ainda se podem juntar corantes, estabilizadores, diluentes e lubrificantes.

Os termoplásticos quando sujeitos a temperaturas superiores ao ponto de amolecimento respectivo, podem moldar-se plasticamente, voltando ao estado sólido quando arrefecidos.

Teoricamente os polímeros termoplásticos são recuperáveis indefinidamente, já que se pode repetir o processo quantas vezes se quiser, uma vez que os contínuos aquecimentos nunca lhe farão perder a plasticidade; contudo o envelhecimento dos mesmos afecta a sua estabilidade, impondo um limite a uma repetida transformação.

Os materiais poliméricos de maior utilização em construção civil, dentro dos grupos citados são os que constam do Quadro 1.2. As letras indicadas entre parêntesis correspondem às siglas de identificação fixadas pela NP-490 de 1970. A designação química dos materiais poliméricos é, em geral, bastante extensa. Para simplificar a sua referência estabeleceram-se siglas de identificação formadas, na maior parte dos casos, pelas iniciais dos compostos que lhes deram origem.

As siglas de identificação têm como base a nomenclatura inglesa e, no caso dos polímeros, as iniciais dos monómeros (moléculas de massa molecular elevada) são precedidas da letra P (inicial de polímero).

Do ponto de vista do comportamento elástico, podemos dividir os polímeros em dois grupos, plásticos e elastómeros.

Os plásticos são extremamente deformáveis. Quando se aplica uma carga, estes materiais deformam-se bastante. No entanto, a recuperação da deformação é muito lenta.

Os elastómeros são materiais plásticos mais resistentes, com um comportamento elástico rápido: cessada a carga o material volta à forma inicial. Os polímeros deste grupo têm aplicação em aparelhos de apoio. Os silicones e os poli-isobutileno incluem-se neste grupo.

QUADRO 1.2

TERMOPLÁSTICOS	TERMOENDURECÍVEIS
Acetato de celulose (CA)	Fenol - formaldeído (PF)
Polietileno (PE)	Ureia - formaldeído (UF)
Polipropileno (PP)	Melamina - formaldeído (MF)
Poliestireno (PS)	Poliéster insaturado (UP)
Poli (cloreto de vinilo) (PVC)	Epóxido (EP)
Policarbonato (PC)	Silicone (SI)
Poli (acetato de vinilo) (PVAC)	
Poli - isobutileno (PIB)	
Poli (metacrilato de metilo) (PMMA)	
Poliamida (PA)	

1.3 Fabrico dos polímeros

O processo de unir monómeros para formar polímeros é designado por polimerização e pode constar quer duma condensação quer duma adição [3].

No primeiro processo, monómeros ou grupos de monómeros são unidos quimicamente pela interacção de unidades activas em cada um. Neste processo são, frequentemente, libertados subprodutos como água, álcool ou ácido clorídrico.

No processo de adição, os monómeros unem-se entre eles sem interferência de outros produtos. Neste processo, os produtos formados têm a mesma composição que a dos monómeros dos quais foram produzidos.

A produção de materiais poliméricos pode dividir-se em três fases que algumas vezes se sobrepõem. Na primeira fase as matérias primas são transformadas em compostos poliméricos básicos com a forma de grãos, pó ou resinas líquidas. As matérias primas são muito diversificadas, podendo citar-se o petróleo bruto, o carvão, o ar, o cloreto de sódio, o enxofre, a cal, a celulose, o amoníaco, a água, o flúor e a sílica.

Numa segunda fase os compostos básicos são transformados em chapas, filmes, tubos, varões e outras formas sólidas ou semissólidas. Durante este processo, os

polímeros são, geralmente, combinados com um ou mais materiais para se obterem certas propriedades físicas [4]. Introduzem-se, por exemplo, fibras de amianto e fibras vegetais para se aumentar a resistência e a durabilidade e se diminuir a ductilidade. Por outro lado, usando solventes pode dar-se ao polímero mobilidade temporária, permitindo, assim, a sua projecção à pistola ou a aplicação a pincel (exemplos: benzina e acetona). A utilização de plastificantes permite aumentar a trabalhabilidade. As cargas são introduzidas para engrossar o produto. Os endurecedores utilizam-se para dar início ao processo de endurecimento. Os estabilizadores diminuem a degradação dos polímeros por acção do calor, ar e raios ultravioletas [2]. Além destes produtos podemos adicionar matérias corantes, pigmentos, retardadores de combustão, fungicidas, desodorizantes, lubrificantes, etc.

Como última fase do processo de fabrico temos aquela em que é dada forma final ao produto.

Os polímeros podem adquirir a sua forma final através de numerosos processos cujas designações são as que podemos ver nos Quadros 1.3 (termoplásticos) e 1.4 (termoendurecíveis) [1]. Existem ainda outras técnicas de transformação menos utilizadas como a injecção-sopro para os termoplásticos e o vazamento para os termoendurecíveis.

QUADRO 1.3

	Processos	Base de Partida	Produtos Obtidos	mm espessuras correntes 0,01 0,1 1 10	Dimensionamento Corrente	CICLO Descontínuo	CICLO Contínuo
Técnicas de base	Injecção	grânulos	Qualquer forma		de alguns g a 15 kg	x	
	Extrusão		Todas as formas de perfis		comprimento até 2,5		x
	Sopro		corpos ocos		Volume < 200 l	x	
	Rotomoldação	pós finos (200 a 300 μ)			Volume < 3000 l	x	
	Calandragem	resinas vinílicas + activos	produtos lisos		Comprimento até 2,5		x
Técnicas auxiliares	Termoformagem	folha ou placa proveniente de extrusão ou de calandragem	formas côncavas/ convexas		Peso < 20 kg	x	
	Laminagem	Pastas de PVC, PE, PP ou PU	revestimento plástico flexível sobre revestimento têxtil		100 a 600g/m²		x
	Revestimento	pós finos (50 a 200 μ)	revestimento plástico sobre suporte metálico		depósito médio 300 μ	x	

No fabrico por injecção, quantidades determinadas de pó ou grânulos são introduzidas num tambor aquecido da máquina de moldagem e obrigados a progredir

pela acção de um êmbolo. O material quando atinge a entrada do tambor torna-se fluído. Em seguida é forçado a entrar numa forma onde arrefece e solidifica.

QUADRO 1.4

	Processos	Base de Partida	Produtos Obtidos	mm espessuras correntes 0.1 1 10	Dimensionamento	Ciclo
Pressão < 100 kg/cm² termoplásticos amorfos reforçados	Compressão	pós	quaisquer formas		de alguns g a 1 kg	
	Transferência				de alguns g a 0.5 kg	
	Prensagem entre pratos	folhas de papel Têxteis impregnados	produtos lisos		até 2.5 x 1.5 m	
Pressão 0 a 100 kg/cm² poliester epóxidos resinas	Contacto	resina + tecido de vidro	estruturas pré-fabricadas		até 100 kg	descontínuo
	Projecção	resina + filamento de vidro				
	Prensagem	resina - vidro: pré-formada ou pré-mesturada ou pré-impregnada	forma côncava/convexa		10 kg e mais	
	Estratificação em contínuo	resina + vidro compacto	perfis		comprimentos < 1 m	contínuo
	Enrolamento de filamentos	resina + fio de vidro	corpo de revolução		alguns 100 t	descontínuo

Quase todos os termoplásticos podem ser moldados por este processo. Nylon, acrílicos, polietilenos, celulósicos e poliestireno são os polímeros mais utilizados em moldagem por injecção, dando origem a uma grande variedade de produtos acabados, tais como: engrenagens, puxadores, cestos dos papéis e caixotes do lixo.

A compressão e a transferência são técnicas que permitem obter um resultado análogo ao nível dos produtos acabados utilizando polímeros termoendurecíveis.

Na compressão, uma determinada quantidade de pó é colocada num molde aquecido, que é em seguida encerrado. O calor e a pressão aplicados ao pó fazem com que ele funda e se espalhe por todas as partes do molde. Depois o material é retirado do molde para arrefecer. A moldagem por transferência é semelhante à moldagem por compressão excepto no facto de o pó ser aquecido e fundido fora do molde e só depois injectado para o interior deste. Resinas fenólicas são os materiais poliméricos mais utilizados neste processo mas podem também utilizar-se resinas melamínica, de ureia e de epóxido.

Os fabricos por extrusão ou por estratificação em contínuo são utilizados para a produção em série de materiais com secção constante. Nestes processos a matéria

polimérica semilíquida é forçada a passar através de uma fieira. Polietileno, policloreto de vinilo, resinas celulósicas e poliestireno são os polímeros mais usados nestes processos. Os produtos resultantes podem ser chapas (10 *mm* de espessura ou mais), varões e tubos. Um outro método semelhante designado por revestimento consiste em obrigar um suporte metálico (fios, cabos ou varões) a passar através de uma fieira com o polímero de tal forma que o material sai com um revestimento polimérico.

Os processos de sopro, rotomoldação e enrolamento de filamentos permitem a obtenção de produtos ocos com variadas configurações como tanques, tubos, garrafas e outros recipientes para água.

Na moldagem por sopro, uma máquina de extrusão expulsa um tubo oco que é capturado entre as duas metades de um molde oco. Com o molde fechado, o ar soprado para o interior do tubo expande-o e obriga-o a adaptar-se à superfície interior do molde. O polímero mais transformado por este processo é o polietileno, mas também se utilizam o policloreto de vinilo, o poliestireno e o polipropileno.

A rotomoldação consiste em colocar uma dada quantidade de pó na metade inferior do molde, que em seguida é fechado. O molde é depois obrigado a rodar em torno de um eixo que toma várias posições no espaço por forma a distribuir o material uniformemente sobre as superfícies interiores. Em seguida, é introduzido num forno para aquecer e curar o polímero, arrefecido e, finalmente, aberto, para se retirar o produto. O enrolamento de filamentos é um processo semelhante mas que utiliza uma resina líquida e fibras de vidro como materiais de base.

Na calandragem o polímero é introduzido entre cilindros em rotação dos quais sai uma fina chapa ou filme. A espessura do produto é determinada pelo espaço entre cilindros e a superfície da chapa pode ser lisa ou com rugosidades, dependendo da superfície do cilindro. Num processo similar, papel, metal, tecido, material cerâmico ou outro polímero passam através de cilindros que lhes aplicam um revestimento polimérico de um ou dos dois lados. Os polímeros termoendurecíveis podem ser transformados por um processo equivalente ao da calandragem designado por prensagem entre pratos.

A laminagem e o contacto consistem na impregnação de chapas de papel, fibra de vidro ou tecido com uma pasta de termoplástico ou com uma resina líquida termoendurecível aplicando-se em seguida, calor e pressão a um certo número de chapas para formar um produto laminado. Resinas de epóxido, melamínica, de ureia e fenólicas são utilizadas para produzir uma grande variedade de painéis de parede, tampos de mesa e outros produtos laminados.

Na termoformação lâminas de matéria polimérica são aquecidas até amolecerem e então atiradas por intermédio de ar comprimido contra uma superfície fria do molde onde arrefecem e endurecem. Policloreto de vinilo, resinas celulósicas e

resinas acrílicas são os plásticos mais usados neste processo. Clarabóias em forma de cúpula (Fig. 1.1), revestimentos interiores de frigoríficos e chávenas são produtos tipicamente obtidos por este processo.

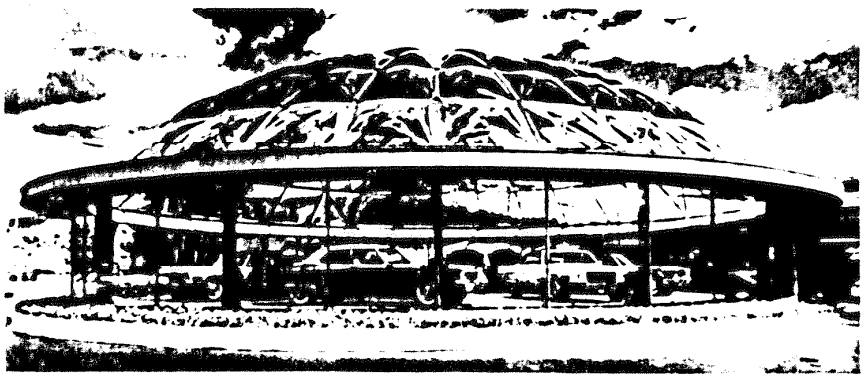


Fig. 1.1 - *Cobertura com placas acrílicas obtidas por termoformação*

Como se pode observar no Quadro 1.5, onde se resume a correspondência entre os processos de fabrico próprios de termoplásticos e de termoendurecíveis, a prensagem é o processo que permite obter um resultado análogo ao da termoformação, ao nível do produto acabado. Utiliza-se uma mistura de resina e vidro e obtêm-se formas côncavas e convexas.

QUADRO 1.5

TERMOPLÁSTICOS	TERMOENDURECÍVEIS
Injecção	Compressão, Transferência
Extrusão	Estratificação em contínuo
Sopro, rotomoldação	Enrolamento de filamentos
Calandragem	Prensagem entre pratos
Termoformação	Prensagem (préformado, prémisturado, préimpregnado)

A moldagem por vazamento é um processo simples no qual os polímeros na forma líquida, com os apropriados agentes de cura, são vazados nos moldes onde

endurecem com ou sem calor. Em geral, silicones, resinas de epóxido, poliester e poliuretano são transformadas por este processo. Os produtos obtidos são tubos, varões e chapas.

Além dos processos já descritos, também se executam produtos alveolares pelos métodos de expansão ou de "espuma" (Quadro 1.6).

QUADRO 1.6

Processo	Base de partida	Produtos Obtidos	Densidade	Ciclo	
				Descontínuo	Contínuo
Expansão	granulos de PS expansível	quaisquer formas		x	
ou Espuma	isocianatos + poliois	ou blocos	45 a 50 kg/cm^3	x	x

Na expansão pequenos grânulos do polímero adicionados de uma pequena quantidade de um agente expansivo são introduzidos num tambor giratório com aquecimento a vapor. O calor amolece os grânulos e os agentes expansivos aumentam o seu tamanho. Quando eles atingem o tamanho requerido, são arrefecidos e os grânulos expandidos são transferidos para um molde fechado onde são novamente aquecidos a vapor de água. Isto amolece-os uma vez mais e eles unem-se para formar um bloco. Os produtos obtidos por este processo constituem um bom material isolante.

Para a obtenção de espuma de poliuretanos, parte-se dos monómeros (isocianatos e poliois), e não dos polímeros como para o caso do poliestireno expandido. Embora menos utilizadas podem obter-se espumas de polietileno, policloreto de vinilo e resinas fenólicas.

Os acabamentos dos produtos finais podem ser de três tipos:

a) eliminação de irregularidades: tornagem, fresagem e perfuração;

b) corte: material mole ou semi-rígido: guilhotina — material rígido: serra circular — espuma: serra, fio quente;

c) polimento

A montagem é feita por soldadura (térmica, alta frequência ou ultrasons) ou colagem.

A soldadura térmica pode efectuar-se com ou sem material de adição, por compressão ou placa aquecida, mas também por fricção. Os termoendurecíveis não podem ser soldados.

A montagem irreversível pode, ainda, efectuar-se por: rebitagem, agrafagem e costura (filmes ou folhas). Para a montagem reversível utilizam-se parafusos ou grampos.

Para finalizar, há processos de decoração de superfície, tais como: metalização a vácuo (alumínio), deposição electrolítica (cobre, níquel ou crómio) e gravação [1].

1.4 Propriedades dos polímeros

Devido à diversidade de polímeros, copolímeros e modificantes, a variedade de propriedades dos plásticos úteis para a construção civil é muito grande. Um conhecimento de algumas destas propriedades básicas é útil para determinar se um dado polímero pode ou não utilizar-se numa determinada aplicação. Entre as propriedades mais importantes para a construção temos: resistências mecânicas, massa volúmica, ductilidade, tenacidade, dureza, características visuais ópticas, resposta aos agentes térmicos, permeabilidade, resistência ao choque, resistência ao desgaste, resistência ao atrito, resistência a águas agressivas e durabilidade.

As resistências mecânicas dos polímeros são, em geral, muito elevadas. Estas resistências dependem tanto do polímero como dos factores tecnológicos de obtenção do produto. Assim um polímero moldado apresenta resistência à tracção da ordem dos 25 MPa e um polímero reforçado e laminado pode apresentar resistências da ordem dos 950 MPa [5]. Em relação à resistência à compressão ela pode atingir 200 MPa, valor também alcançado por alguns polímeros como resistência à flexão. A temperatura e a velocidade de ensaio têm muita influência sobre as resistências mecânicas. Por exemplo, os termoplásticos amolecem a temperaturas elevadas e endurecem ao arrefecerem, tornando-se muito frágeis.

A massa volúmica dos polímeros varia de 10 a 2200 kg/m^3. São portanto muito leves e resistentes. Apresentam, assim, um coeficiente de qualidade construtiva (definido pelo quociente da resistência do material pela sua massa volúmica) muito elevado. Se para uma parede de tijolo esse coeficiente é igual a $0,02$, para os betões é cerca de $0,06$, para o aço $0,5$, para o duralumínio $1,6$, atinge valores entre 2 e $2,2$ para os polímeros reforçados com fibra de vidro.

Os polímeros são, na sua maioria, materiais dúcteis, apresentando módulos de elasticidade mais baixos que os de outros materiais de construção. Os epóxidos têm um módulo de elasticidade da ordem dos 5 GPa. Outros polímeros podem apresentar módulos de elasticidade de 50 GPa.

Alguns polímeros são extremamente tenazes; outros são bastante quebradiços.

Os polímeros podem ser relativamente duros e rígidos, enquanto outros são moles e flexíveis. As comparações entre materiais são difíceis de fazer, mas é evidente que os polímeros não são tão duros quanto o aço ou o vidro, mas muitos são mais duros que a madeira, na direcção normal às fibras.

Os polímeros riscam-se mais facilmente que o vidro, mas o acabado com melamina, em laminados de alta pressão, é mais resistente à riscagem que as lacas e vernizes correntes. Os riscos nos materiais poliméricos costumam ser menos irregulares que noutros materiais mais duros e quebradiços, podendo, em geral, eliminar-se por polimento.

A dureza Brinell dos plásticos é baixa. Os poliestireno e os acrílicos têm uma dureza de, aproximadamente 150 MPa, as resinas celulósicas 40 a 50 MPa (o aço chega a atingir 4500 MPa).

Tanto os termoplásticos como os termoendurecíveis podem ser muito transparentes, opacos ou ter todos os graus de transparência e transmissão de luz intermédios.

Um polímero como o polimetacrilato de metilo está entre os materiais disponíveis mais transparentes, com uma transmissão de luz visível de 93% ou superior — quase tão elevada como a teoricamente possível em função do índice de refracção. Outros, tais como certos tipos de poliestireno, policloreto de vinilo e acrílicos fundidos apresentam valores aproximados, entre 88 a 92%, o que os coloca na mesma categoria dos vidros claros.

Os materiais poliméricos podem colorir-se facilmente. Se se utilizarem pigmentos estáveis, os polímeros conservam a sua coloração durante muito tempo, evitando, assim, a necessidade de pinturas periódicas, o que reduz as despesas de conservação.

O comportamento dos polímeros ao calor é mau. Como todos os materiais de construção, os polímeros dilatam-se e contraem-se ao aumentar e diminuir a temperatura, mas para muitos polímeros a variação de comprimento é apreciavelmente maior que para muitos outros materiais de construção. Os coeficientes de dilatação linear dos polímeros variam entre $1,5 \times 10^{-5}\ {}^{o}C^{-1}$ para os poliesteres reforçados e $20 \times 10^{-5}\ {}^{o}C^{-1}$ para os polietilenos, ou seja são entre 1,5 a 20 vezes superiores aos do aço e do betão.

Os polímeros têm, ainda, uma deformação por fluência elevada; sob uma carga constante desenvolve-se uma deformação plástica muito mais importante que noutros materiais, por exemplo no aço ou no betão [5].

Comparados com os metais os polímeros são isolantes do calor. A maioria dos polímeros sólidos têm, no entanto, coeficientes de transmissão de calor mais altos que a madeira na direcção perpendicular às fibras, o tijolo ou o betão.

Os coeficientes de transmissão de calor dos polímeros reforçados, laminados ou com cargas, dependem da natureza dos aditivos.

Os polímeros expandidos estão entre os melhores isolantes disponíveis. A condutividade térmica das espumas depende, entre outros factores, da densidade, das células serem abertas ou fechadas e do agente expansivo utilizado para o seu fabrico.

Em geral, quanto menor for a densidade, menor será a condutibilidade térmica, K, mas se a densidade for demasiado baixa, o tamanho das células aumenta até um ponto em que podem estabelecer-se, dentro das células, apreciáveis correntes de convecção, e a condutibilidade térmica aumenta.

O poliestireno expandido e a espuma de poliuretano têm coeficientes de condutibilidade térmica da ordem dos 126 $J/h\,m\,^{\circ}C$ sensivelmente iguais aos da cortiça e do ar (sem transporte por convecção) e bastante inferiores aos do betão, vidro ou tijolo [6].

A resistência térmica da maior parte dos polímeros é baixa (de 70 a 250$^{\circ}C$). Os termoplásticos são os menos resistentes amolecendo a temperaturas entre 70 e 120$^{\circ}C$. Os silicones são os mais resistentes, podendo trabalhar a temperaturas da ordem dos 250$^{\circ}C$. Alguns polímeros têm o inconveniente de libertarem matérias tóxicas durante a sua combustão.

Os polímeros podem apresentar baixas permeabilidades ao vapor de água. Os menos permeáveis são o polietileno, o polipropileno, os acrílicos e os poliesteres.

Uma propriedade muito importante dos polímeros é a sua resistência ao choque que é mais elevada que a da maioria dos outros materiais de construção. Devido a esta propriedade, inúmeros materiais quebradiços foram substituídos pelos polímeros.

Podemos, também, encontrar polímeros com elevada resistência ao desgaste e ao atrito.

Os polímeros são inertes à água potável e aos líquidos orgânicos. Certos polímeros como o polietileno, o polisobutileno, o poliestireno e o policloreto de vinilo, resistem a soluções concentradas de ácidos, sais e alcalis. Devido a esta propriedade podem-se utilizar na construção de instalações para a indústria química e na condução de águas e esgotos.

Com o tempo os polímeros envelhecem, ou seja, são sujeitos a uma degradação lenta que afecta as suas propriedades. A resistência e a dureza diminuem e tornam-se baços e moles. Este envelhecimento é acelerado pela acção conjunta da temperatura, do ar e da luz (raios ultravioletas). Os raios ultravioletas aceleram os processos de envelhecimento e decomposição dos polímeros, através de reacções de oxidação.

1.5 Aplicações dos polímeros

1.5.1 Revestimento de pavimentos

Os polímeros são muito utilizados para o revestimento de pavimentos. Estes materiais resistem bem ao desgaste, têm baixa condutibilidade térmica, são quase todos hidrófugos, não expandem com a humidade, são suficientemente duros e resistentes, ou seja satisfazem todas as exigências impostas à construção de pavimentos [5].

Os polímeros mais utilizados para esta aplicação são o policloreto de vinilo e o acetato de vinilo. Estes materiais podem apresentar-se sob três formas: em rolos (telas), em placas e materiais para a construção de pavimentos sem juntas.

As telas para o recobrimento de pavimentos são confeccionadas a partir de polímeros e agregados diferentes. Na sua composição entram, também, os plastificantes, os pigmentos e outros aditivos. Pode obter-se uma variedade muito grande de telas com base termoisolante e acústica, de uma camada ou de várias camadas, originando revestimentos lisos, estriados ou fibrosos, de uma só cor ou multicoloridos.

As placas são confeccionadas com polímeros, plastificantes, agregados e pigmentos. Podem aplicar-se directamente sobre as bases de betão com a ajuda de colas ou mastiques especiais.

As placas para pavimentos são produzidas com grande variedade de forma (quadradas, rectangulares, etc.), de estrutura (uma ou várias camadas, arestas rectangulares ou com ranhuras e línguas), com cores variadas, lisas ou estriadas. O emprego de placas de cores diferentes permite variar o aspecto estético dos pavimentos. As partes danificadas dos pavimentos revestidos com placas são de fácil reparação.

Os pavimentos monolíticos, sem juntas, executados com materiais à base de polímeros, são os mais higiénicos, os mais cómodos em serviço e possuem alta resistência ao desgaste. Os mais utilizados são os mastiques de acetato de polivinilo e as misturas polímero-cimento. Os mastiques de acetato de polivinilo não se podem aplicar em locais em que exista humidade elevada, assim como em instalações industriais solicitadas por cargas de choque ou que possuam equipamento de transporte de suspensão rígida.

As misturas polímero-cimento para o revestimento de pavimentos são obtidas a partir da emulsão de acetato de polivinilo ou latex, cimento, areia e pigmentos minerais. Estas composições aderem muito bem à base e têm alta resistência mecânica.

No que diz respeito à consistência das composições, estas podem ser plásticas (a aplicação efectua-se com máquinas apropriadas ou com dispositivos vibradores) e de enchimento, que se aplicam por pulverização ou que se despejam, simplesmente sobre o pavimento. As composições para o revestimento de pavimentos monolíticos

de variados tipos devem conduzir a superfícies lisas sem juntas, sem bossas resultantes da moldagem, crostas nem rugosidades e de cor homogénea. O revestimento não se deve destacar da base, nem fissurar ou descascar durante a exploração.

1.5.2 Acabamento interior de paredes

Os materiais de revestimento à base de polímeros são superiores a todos os outros materiais de revestimento. Isto, tendo presente as suas qualidades decorativas, a variedade de tonalidades e de desenhos, o brilho das cores e as suas propriedades higiénicas. Estes materiais podem apresentar-se em rolos, folhas ou placas.

Os materiais em rolos para o acabamento interior de paredes são fabricados com polímeros, plastificantes, agregados, pigmentos e corantes, sobre suporte ou não. Os suportes utilizados podem ser, entre outros, cartão, papel ou tecido de algodão.

Os materiais em folhas são obtidos de folhas de papel ou madeira impregnadas de uma solução polimérica.

As placas de revestimento à base de polímeros ultrapassam todos os outros materiais de revestimento do ponto de vista das qualidades decorativas, com grande variedade de tonalidades e de desenhos. Fabricam-se placas de três tipos: em poliestireno, em policloreto de vinilo e em fenolite.

1.5.3 Canalizações

Nos últimos anos os tubos em polímero têm substituido outros materiais como o ferro fundido, o latão, o chumbo, o cobre e o grés, na montagem de condutas industriais, na canalização de águas e esgotos, em condutas de petróleo e em sistemas de irrigação. Os polímeros mais utilizados são o policloreto de vinilo, o polietileno e os poliesteres reforçados com fibra de vidro.

As vantagens relativamente a outros materiais são: elevada resistência à corrosão electroquímica, baixa condutibilidade eléctrica, flexibilidade, leveza e estabilidade química. Os custos de instalação e de conservação das condutas em polímeros são inferiores aos das condutas metálicas.

A baixa resistência ao calor dos tubos poliméricos é a sua característica desfavorável. Por exemplo, os tubos em polietileno e em policloreto de vinilo não podem ser utilizados para o transporte de líquidos a temperaturas superiores a $60°C$ [5].

Os tubos de polietileno são fabricados em polietileno de alta pressão por extrusão. O polietileno possui propriedades dieléctricas elevadas, é resistente à água, a soluções salinas, ácidas, alcalinas e a óleos diferentes. O polietileno possui uma absorção de água muito baixa, arde lentamente e sem chama.

Os tubos de polietileno não são geladiços, o que permite a sua utilização no

intervalo de temperaturas de $+60$ a $-80°C$. Estes tubos são plásticos o que possibilita o seu enrolamento sobre tambores sendo transportados assim. Os tubos de polietileno são muito fáceis de trabalhar, podem-se cortar, aplainar, virar, etc., mas não se podem colar porque não há colas que adiram completamente à superfície do polietileno. Geralmente, soldam-se com o auxílio de ar quente. Para a união dos tubos utilizam-se adições de policloreto de vinilo ou de metais leves.

Nos tubos de policloreto de vinilo pode transportar-se líquidos cuja temperatura não exceda os $40°C$ sob pressão. Se a temperatura variar entre 40 e $60°C$ só podem ser transportados por gravidade. A condutibilidade térmica destes tubos é 400 vezes inferior à dos tubos metálicos. Os tubos de policloreto de vinilo podem-se colar, soldar ou ligar com o auxílio de manilhas e uniões especiais. Os tubos neste polímero utilizam-se em canalizações de água, de esgotos e de ventilação, assim como para o transporte de líquidos e gases agressivos. Devem armazenar-se em locais fechados a uma temperatura entre 10 e $20°C$. Durante o transporte é necessário protegê-los dos choques.

Os tubos fabricados à base de polímeros de poliesteres armados com fibras de vidro distinguem-se pelas suas propriedades mecânicas e anticorrosivas e pela sua alta solidez em comparação com os outros tubos à base de polímeros. Resistem bem à acção de um grande número de ácidos, hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos, etc. Os tubos em poliester reforçado com fibras de vidro podem ser fabricados por diferentes processos: por enrolamento num mandril, por moldagem numa centrifugadora e por estiragem contínua da fibra de vidro.

1.5.4 Artigos sanitários

Diferentes peças em polímeros são confeccionadas para serem utilizadas como equipamento sanitário. São leves, atraentes, sólidas e anticorrosivas, resistem bem a soluções ácidas e alcalinas. Geralmente são à base de poliestireno, mas também podem ser de polimetacrilato de metilo. Fabricam-se lavatórios, banheiras, cabinas de duche, grelhas de ventilação, bancas de cozinha e outros produtos.

Os elementos das instalações sanitárias feitos com polímeros têm grandes vantagens sobre os elementos metálicos. Têm um peso moderado, são mais resistentes, não necessitam de ser sistematicamente pintados, são anticorrosivos, higiénicos e têm um aspecto atraente.

1.5.5 Colas e mastiques

O aparecimento de materiais poliméricos no domínio da construção fez com que se desenvolvessem processos de ligação originais e susceptíveis de proporcionar trabalhos interessantes, embora o seu custo continue a ser elevado [7].

As colas à base de polímeros empregam-se na ligação dos mais variados materiais de construção como madeira, aço e betão, entre outros. Os polímeros mais utilizados no fabrico destas colas são os fenólicos, os epóxidos, os poliuretanos e os poliesteres. A escolha da cola a utilizar deve ter em conta o tipo de materiais a unir (Quadro 1.7) [4]. Assim, as colas fenólicas são boas para ligar plásticos e madeiras [5]. As colas de epóxido utilizam-se para unir betão, alumínio e aço. As colas de poliester são utilizadas na ligação de plásticos reforçados. As colas de poliuretano usam-se para colar madeiras.

As colas à base de poliester e de poliuretano toleram mal a humidade. As colas de poliester apresentam resistências mecânicas elevadas mas têm, em geral, uma retracção importante e podem saponificar em contacto com o betão o que origina má aderência [2].

Os polímeros mencionados anteriormente pertencem ao grupo dos termoendurecíveis. Estes polímeros apresentam-se, geralmente, sob a forma de dois constituintes, designados por base e endurecedor, que se misturam na altura da aplicação. Produz-se uma reacção química que dá origem a uma cadeia macromolecular.

No que diz respeito aos epóxidos e aos poliuretanos, a polimerização produz-se após o contacto dos dois constituintes que reagem entre si. Estes constituintes devem ser cuidadosamente misturados, em proporções bem definidas, para obter o polímero final dotado das propriedades desejadas. Qualquer desvio dessas proporções pode originar um produto com características não só inferiores, mas também, eventualmente, catastróficas. Por este motivo, os constituintes são fornecidos em recipientes em que a totalidade dos conteúdos deve ser utilizada na mistura.

Para os poliesteres, o mecanismo de polimerização é completamente diferente. Esta produz-se após adição de um catalisador cuja dosagem tem uma menor influência sobre as propriedades do polímero final obtido [8].

Em colagens de materiais de construção utilizam-se, também, polímeros do grupo dos termoplásticos como os acrílicos, os estireno-acrílicos, o acetato de polivinilo e os seus copolímeros e os estireno-butadienos. Um polímero termoplástico pode apresentar-se sob três formas, no momento da aplicação: sólido, de tal forma que a sua aplicação é precedida do seu aquecimento para diminuir a viscosidade, diluído num solvente ou sob a forma de emulsão aquosa.

Os mastiques mais utilizados são à base de polisobutileno ou de silicone. Aplicam-se na vedação de juntas de dilatação como por exemplo entre painéis prefabricados. Podem aplicar-se à pistola e com ar comprimido. Há mastiques de dois constituintes que se autovulcanizam. Outros constituem uma pasta homogénea, espessa, que não endurece, com cores que podem variar do cinzento claro ao castanho.

QUADRO 1.7

SELECÇÃO DOS PRINCIPAIS POLÍMEROS COLANTES CONFORME A NATUREZA DOS MATERIAIS ADERENTES

Aderentes	Couros	Papel cartão	Madeiras	Feltros	Tecidos	Plásticos vinílicos	Plásticos fenólicos	Borrachas	Telha, etc.	Massames alvenarias	Vidro e cerâmica	Metais
Metais	1, 4, 21, 24, 25	1, 21, 22,	1, 4, 11, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	1, 5, 22	1, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	13, 21, 22, 31, 32, 33, 35, 36	5, 6, 13, 22, 35	5, 6, 13, 32	13, 32, 33, 34, 35	11, 13, 31, 32, 33, 36
Vidro e cerâmica	1, 4, 13, 24	1, 21, 22	1, 13, 21, 31, 32, 33, 35, 36	1, 5, 6, 21, 22	1, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 21, 31, 35, 36	21, 22, 31, 35, 36	4, 22		4, 13, 32, 35, 36	
Telhas, etc.	1, 4, 21, 24	1, 21, 22	1, 5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 36	21, 22, 31, 35, 36	4, 5, 6, 22	5, 13		
Alvenarias massames	1, 21, 24	1, 21, 22	1, 5, 6, 21	5, 6, 21, 22	5, 6, 21, 22, 24	25, 36	3, 13, 36	21, 22, 31, 35, 36	5, 6, 22			
Borrachas	21, 24	21, 22	21, 22, 33, 35, 36	21, 22	21, 22, 23	25, 36	21, 22, 36	21, 37, 31, 35, 36				
Plásticos fenólicos	21, 24, 25	21, 22	11, 13, 21, 24, 32, 33, 36	21, 22, 25, 36	21, 22, 24, 25	36	13, 32, 33, 36					
Plásticos vinílicos	21	21	21	21	21	25, 36						
Tecidos e panos	21, 22, 23, 24	21, 22, 23	21, 22, 23	5, 21, 22, 23	1, 21, 22, 23							
Feltros	21, 22, 23, 24	21, 22, 23	21, 22, 23	5, 22								
Madeiras	21, 22, 23, 24	2, 21, 22	1, 11, 12, 14, 15, 36									
Papel e cartões	21, 22, 23, 24	2, 4, 21										
Couros	1, 4, 21, 22, 23, 24											

Termoplásticos:

(1) Acetato de polivinilo
(2) Álcool polivinílico
(3) Acrílicos
(4) Nitrocelulose
(5) Asfaltos
(6) Oleorresinosos

Termoendurecíveis:

(11) Fenólicos
(12) Resorcinol; fenol-resorcinol
(13) Epoxílicos (epoxy)
(14) Ureia-formaldeído
(15) Melamina; ureia melamina
(16) Alquídicos

Elastómeros:

(21) Borracha natural
(22) Borracha clorada (reclaim)
(23) Estireno-butadieno (SBR)
(24) Policloropreno (Neopreno)
(25) Buna-N
(26) Silicones

Mistura de resinas (duplo polímero):

(31) Fenólica-vinílica
(32) Fenólica-butiral de polivinilo
(33) Fenólica-formal de polivinilo
(34) Fenólica-poliamida
(35) Fenólica-neopreno
(36) Fenólica-butadieno-nitrilo

1.5.6 Outras aplicações

As aplicações dos materiais poliméricos como material de construção não se restringem às situações atrás mencionadas.

Podem, ainda, fabricar-se com polímeros, estores, corrimãos, acessórios de iluminação, puxadores, fechos, caixilharias, cofragens, etc. (Fig. 1.2).

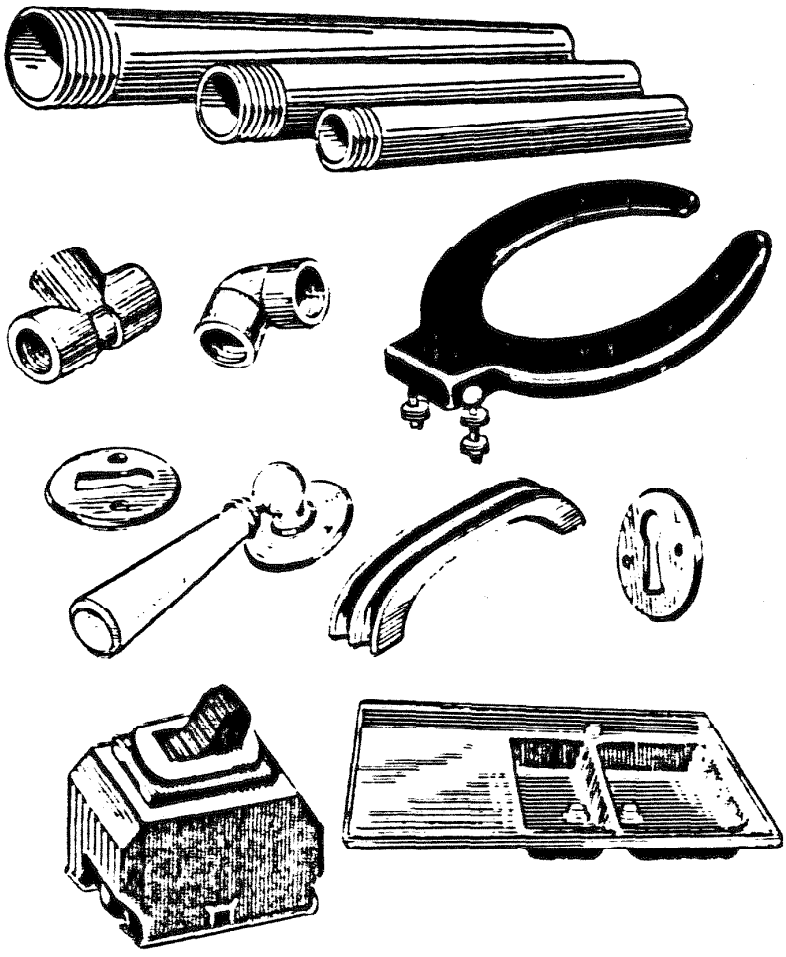


Fig. 1.2 - *Elementos da construção fabricados com materiais poliméricos*

1.6 Normalização

Relacionando-se com as propriedades e as aplicações dos polímeros como material de construção, há algumas Normas Portuguesas em vigor (Quadros 1.8.1 a

QUADRO 1.8.1

MATERIAIS PLÁSTICOS — NORMAS

NORMA	ANO	TÍTULO
NP 253	1985	Tubos de material plástico de secção circular para transporte de fluidos. Diâmetros exteriores e pressões nominais.
NP 490	1970	Plásticos. Siglas de identificação.
NP 558	1969	Tubos de polietileno. Determinação do índice de fusibilidade do polietileno.
NP 691	1972	Tubos de polietileno de massa volúmica baixa para canalização de água e esgoto. Características e recepção.
NP 692	1972	Tubos de polietileno de massa volúmica baixa. Ensaio de pressão interior.
NP 706	1984	Materiais plásticos. Ambientes atmosféricos de condicionamento e de ensaio.
NP 786	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Determinação da espessura.
NP 787	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de resistência ao cigarro aceso.
NP 788	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de resistência aos produtos domésticos.
NP 789	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de comportamento em água em ebulição.
NP 790	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de resistência térmica superficial.
NP 791	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de resistência hidrotérmica superficial.
NP 792	1970	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de absorção de água.
NP 925	1972	Tubos de polietileno. Ensaio de estabilidade das dimensões.

QUADRO 1.8.2

MATERIAIS PLÁSTICOS — NORMAS

NORMA	ANO	TÍTULO
NP 949	1973	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de incombustibilidade.
NP 1198	1976	Materiais plásticos. Ensaio de tracção.
NP 1372	1976	Tubos de material plástico. Uniões. Ensaio de pressão interior.
NP 1373	1976	Placas de materiais plásticos termoendurecidos ou termoplásticos. Ensaio de choque.
NP 1452	1985	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado. Determinação da deformação longitudinal a quente.
NP 1453	1977	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado. Ensaio de choque a zero graus centígrados.
NP 1454	1985	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado. Ensaio de resistência à acetona.
NP 1455	1986	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado. Ensaio de resitência ao ácido sulfúrico.
NP 1456	1977	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado. Ensaio de pressão interior.
NP 1487	1977	Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado para canalizações de água e de esgoto. Características e recepção.
NP 2120	1986	Materiais plásticos. Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear.
NP 2121	1983	Materiais plásticos reforçados de vidro. Determinação da dureza Barcol.
NP 2122	1983	Materiais plásticos e borrachas. Materiais celulares. Determinação das dimensões lineares.
NP 2123	1983	Materiais plásticos. Materiais celulares rígidos. Ensaio de compressão.

QUADRO 1.8.3

MATERIAIS PLÁSTICOS — NORMAS

NORMA	ANO	TÍTULO
NP 2124	1983	Materiais plásticos. Materiais celulares rígidos. Ensaios de estabilidade dimensional.
NP 2125	1983	Materiais plásticos e borrachas. Materiais celulares. Determinação da massa volúmica aparente.
NP 2166	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação da deformação a $100^{o}C$.
NP 2206	1986	Materiais plásticos. Tubos de polipropileno. Condições para a realização do ensaio de resistência à pressão interior.
NP 2207	1986	Materiais plásticos. Tubos de polipropileno. Determinação das tensões admissíveis em função do tempo e da temperatura.
NP 2208	1986	Materiais plásticos. Tubos de polipropileno. Tolerâncias sobre o diâmetro exterior e a espessura da parede.
NP 2209	1986	Materiais plásticos. Tubos de polipropileno. Determinação da deformação longitudinal a quente.
NP 2211	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação da espessura média de uma amostra por processos gravimétricos.
NP 2212	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação da espessura média e da área por unidade de massa de um rolo por processos gravimétricos.
NP 2213	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação do comprimento de um rolo. Método de referência.
NP 2214	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação da espessura por medição directa.

QUADRO 1.8.4

MATERIAIS PLÁSTICOS — NORMAS

NORMA	ANO	TÍTULO
NP 2215	1986	Materiais plásticos. Filme e folha. Determinação da largura. Métodos de referência.
NP 2252	1986	Materiais plásticos.Filme e folha. Determinação da resistência a perfuração rápida.
NP 2253	1986	Materiais plásticos. Formulações à base de polietileno de baixa densidade. Avaliação do grau de dispersão de negro de carbono.
NP 2302	1986	Materiais plásticos. Formulações à base de polietileno de baixa densidade. Determinação por pirolise do teor de negro de carbono.
NP 2303	1986	Materiais plásticos. Formulações à base de polietileno de baixa densidade. Determinação rápida do teor de negro de carbono.
NP 2394	1984	Materiais plásticos. Determinação das características de inflamabilidade dos materiais sob a forma de pequenos provetes quando submetidos a uma pequena chama.
NP 2396	1984	Materiais plásticos reforçados com fibra de vidro. Atmosferas normalizadas de condicionamento e ensaio.
NP 2913	1987	Materiais plásticos para contacto com géneros alimentícios. Tubos de Poli (cloreto de vinilo) não plastificado para o abastecimento de água potável. Extracção do chumbo e do estanho.

1.8.4). Estas normas são, ainda, insuficientes e não cobrem todas as aplicações possíveis dos polímeros. Muitas vezes é necessário recorrer a normas estrangeiras.

A NP-253 de 1985 fixa os diâmetros exteriores nominais e as pressões nominais dos tubos de secção circular, de materiais termoplásticos, destinados ao transporte de fluidos. Os diâmetros exteriores nominais (Quadro 1.9) variam entre 2,5 e 2000 mm. A pressão nominal é a pressão de serviço à temperatura de $20°C$ quando o fluido circulante é a água. As pressões nominais (Quadro 1.10) estão compreendidas entre 0,1 e 1,6 MPa.

A referida norma define a pressão de serviço de um tubo a determinada temperatura como sendo a mais alta pressão que o tubo pode suportar sem sofrer deformações permanentes, em serviço contínuo a essa temperatura, devendo no entanto resistir a sobrepressões de curta duração.

Em relação a tubos, há, ainda, duas normas portuguesas com particular interesse porque determinam características e condições de recepção. Essas normas são a NP-691 de 1972 e a NP-1487 de 1977. A NP-691 diz respeito aos tubos de polietileno de massa volúmica baixa para canalizações de água e de esgoto em que não se preveja acção prolongada de temperaturas superiores a $30°C$. As características a verificar são: características gerais (aspecto, cor, marcação e acondicionamento), dimensões, índice de fusibilidade, estabilidade das dimensões e resistência à pressão interior.

QUADRO 1.9

DIÂMETROS EXTERIORES NOMINAIS
(valores em milímetros)

2,5	180
3	200
4	225
5	250
6	280
8	315
10	355
12	400
16	450
20	500
25	560
32	630
40	710
50	800
63	900
75	1000
90	1200
110	1400
125	1600
140	1800
160	2000

A NP-1487 de 1977 fixa as características e as condições de recepção dos tubos de poli (cloreto de vinilo) não plastificado destinados a canalizações de água e de esgoto. Fixa também as características de resistência e as condições de recepção das respectivas uniões. As características especificadas referem-se apenas a casos

em que a temperatura do líquido a transportar não excede, em regime permanente, $40°C$ e, em curtos períodos, $60°C$. O poli (cloreto de vinilo) não plastificado que constitui os tubos pode ser de dois tipos, a que correspondem as tensões de segurança de 10 MPa e de 6 MPa. As características a verificar são: características gerais (aspecto, cor, opacidade, marcação e acondicionamento), dimensões, deformação longitudinal a quente, resistência ao choque a $0°C$, resistência à acetona, resistência ao ácido sulfúrico e resistência à pressão interior.

QUADRO 1.10

PRESSÕES NOMINAIS

bar		MPa	
1		0,1	
2,5		0,25	
4		0.4	
6	(6,3)	0,6	(0,63)
10		1	
16		1,6	

Um aspecto importante do ensaio de materiais poliméricos é o condicionamento das amostras antes e durante o ensaio. A NP-706 de 1984 estabelece especificações relativas a esse condicionamento, para todo o tipo de materiais plásticos e forma de provetes. A atmosfera recomendada é caracterizada por uma temperatura de $23°C$ e 50% de humidade relativa (Quadro 1.11) e tem em conta as condições atmosféricas ambientes. As tolerâncias são de dois tipos, correntes e reduzidas, para a temperatura e para a humidade relativa (Quadro 1.12).

QUADRO 1.11

Designação	Temperatura $°C$	Humidade relativa %	Pressão 10^{-3} MPa	Observações
Atmosfera 23/50	23	50	86 a 106	Atmosfera recomendada
Atmosfera 27/65	27	65		Para países tropicais

QUADRO 1.12

Tolerâncias	Temperatura $°C$	Humidade relativa %
Correntes	± 2	± 5
Reduzidas	± 1	± 2

Em relação às atmosferas normalizadas para o condicionamento e ensaio de materiais plásticos com fibra de vidro há a NP-2396 de 1984. A atmosfera normalizada é caracterizada por $23°C$ e 50% de humidade relativa. Prevê-se, ainda, uma atmosfera especial de $20°C$ e 65% de humidade relativa. As tolerâncias são iguais às previstas na NP-706 (Quadro 1.12).

Capítulo 2

Reparações e colagens de betões com epóxidos

2.1 Introdução

O aparecimento de materiais poliméricos no domínio da construção civil fez com que se desenvolvessem processos de ligação originais e susceptíveis de proporcionar trabalhos interessantes, embora o seu custo continue a ser elevado [7].

Como já vimos no capítulo anterior as colas à base de polímeros utilizam-se na ligação dos mais variados materiais de construção, como madeira, aço e betão, entre outros. Vamos centrar-nos nas reparações e colagens de elementos de betão por várias razões que passamos a apresentar.

O betão é actualmente o material de construção mais utilizado no mundo. Este facto deve-se à sua facilidade de aplicação, à possibilidade de se moldar, à resistência à compressão elevada, à sua durabilidade e ao seu baixo custo. Estas razões entre outras fizeram do betão um produto privilegiado cuja presença na construção não para de aumentar (edifícios, pontes, pavimentos de estradas, pistas de aeródromos, túneis, canais, etc.).

As primeiras obras em betão construiram-se com alguns cuidados mas o aumento demográfico e a necessidade urgente de reconstrução na Europa, após a segunda guerra mundial obrigaram os industriais da construção a executarem cada vez mais obras em betão, acelerando os ritmos de execução em detrimento da qualidade [9].

Assim, nos nossos dias, as construções de betão construídas à trinta, quarenta anos, necessitam de trabalhos de reparação. Mesmo algumas mais recentes justificam, desde já, intervenções nesse sentido, devido, em grande parte, à acção da poluição atmosférica sobre a aceleração do envelhecimento das obras em betão e da sua degradação.

Como vimos no capítulo anterior, dentre os polímeros que é possível usar em colagens e reparações, são os epóxidos os que têm mais vantagens nas aplicações

a elementos de betão danificados [10]. As reparações podem ser externas (reconstituição de betão carbonatado, aumento da capacidade resistente de elementos de betão e colmatagem de vazios do betão) ou internas (colmatagem de fissuras por injecção) [8]. Igualmente, quando se trata de colagens de elementos de betão (por exemplo elementos préfabricados) ou da ligação de betão fresco a betão endurecido o uso dos epóxidos vem sendo aconselhado e a sua utilização tem aumentado.

2.2 Aderência

Numa ligação de dois sólidos por uma substância líquida adesiva, algumas forças de atracção surgem nas interfaces, criando a união dos dois materiais. Várias teorias tentam explicar este fenómeno, mas, até hoje, nenhuma se pode considerar como completa e algumas são, mesmo, contraditórias [11].

Embora haja muitos estudos no domínio da aderência [7,9,11,12,13,14], as leis que regem este fenómeno são, ainda, mal conhecidas.

Entre as primeiras teorias desenvolvidas a propósito deste assunto, citemos as seguintes [11]:

- teoria da aderência mecânica, considera a aderência devida a ancoragens da cola sobre as irregularidades das superfícies a ligar;
- teoria química, considera que a aderência se deve a forças de valência residuais sobre a superfície dos materiais;
- teoria da absorção, considera que a aderência é um fenómeno de superfície resultante da acção conjunta de várias forças intermoleculares;
- teoria electrostática, baseia-se no efeito resultante da formação de uma dupla camada electrostática, no momento da junção dos dois materiais;
- teoria da difusão, baseia-se na difusão da cola nas camadas superficiais dos materiais a unir;
- teoria de Sharpe — Shanhorm [15], considera pela primeira vez o fenómeno da molhagem das superfícies sólidas.

Esta última teoria é considerada como a mais completa porque para além da já referida molhagem das superfícies tem em conta as aderências mecânica, química, electrostática, de difusão e de absorção.

As forças de aderência têm um campo de acção muito reduzido (alguns nanómetros), por isso uma das condições para uma boa ligação é a existência de um contacto íntimo entre as colas e as superfícies a unir. Verifica-se pois uma

interdependência entre a aderência e o espalhamento líquido-sólido caracterizado pelo ângulo de contacto, θ e pela tensão superficial, σ [16].

O ângulo de contacto, θ, define-se como sendo o ângulo formado entre a superfície sólida e a tangente à gota de líquido no ponto de intersecção desta com a superfície sólida (Fig. 2.1). Se $\theta_1 < \theta_2$, o líquido 1 espalha-se melhor sobre o sólido do que o líquido 2. Portanto, quanto menor for o ângulo de contacto maior é o espalhamento.

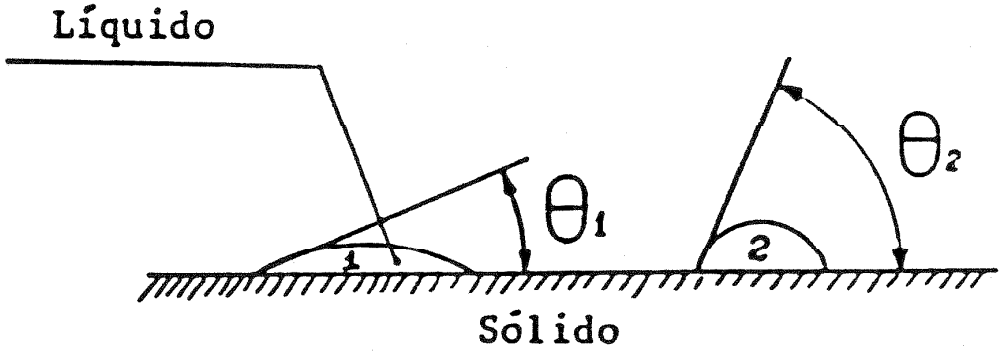


Fig. 2.1 - *Ângulo de contacto*

A tensão superficial, σ, relaciona-se com o ângulo de contacto, através da expressão seguinte (Fig. 2.2):

$$\cos\theta = -a\sigma + b$$

em que a e b são coeficientes que dependem da natureza do líquido e da natureza e estado das superfícies.

Esta relação nem sempre é fácil de definir. Se a superfície onde se deposita a gota de líquido for de um material homogéneo (por exemplo vidro) a relação é fácil de definir. Lamouri [11] tentou determinar os ângulos de contacto de vários ligantes epóxido sobre superfícies de betão obtidas por serragem (lisas, portanto). No entanto, como encontrou uma dispersão muito elevada acabou por desistir e fazer essas determinações sobre o vidro, o que permitirá concluir alguma coisa, mas não é a situação que se pretende estudar.

No gráfico que se apresenta na figura 2.2, verifica-se que quanto menor for a tensão superficial maior é o espalhamento. Donde se pode concluir que para que haja um bom espalhamento e consequentemente uma boa aderência é favorável a utilização de um líquido com um ângulo de contacto e uma tensão superficial baixos. No entanto, é importante não esquecer outro parâmetro que intervém no fenómeno da aderência, nesta fase, que é a posição das superfícies a colar. Se para superfícies

horizontais ou injecção de fissuras o que atrás ficou dito favorece a ligação, o mesmo não se aplicará a superfícies inclinadas ou verticais. Para este tipo de superfícies a escolha de uma cola com baixo ângulo de contacto e tensão superficial pode ser prejudicial, pois corre-se o risco de se perder demasiada cola e surgirem muitos vazios na interface cola/substrato.

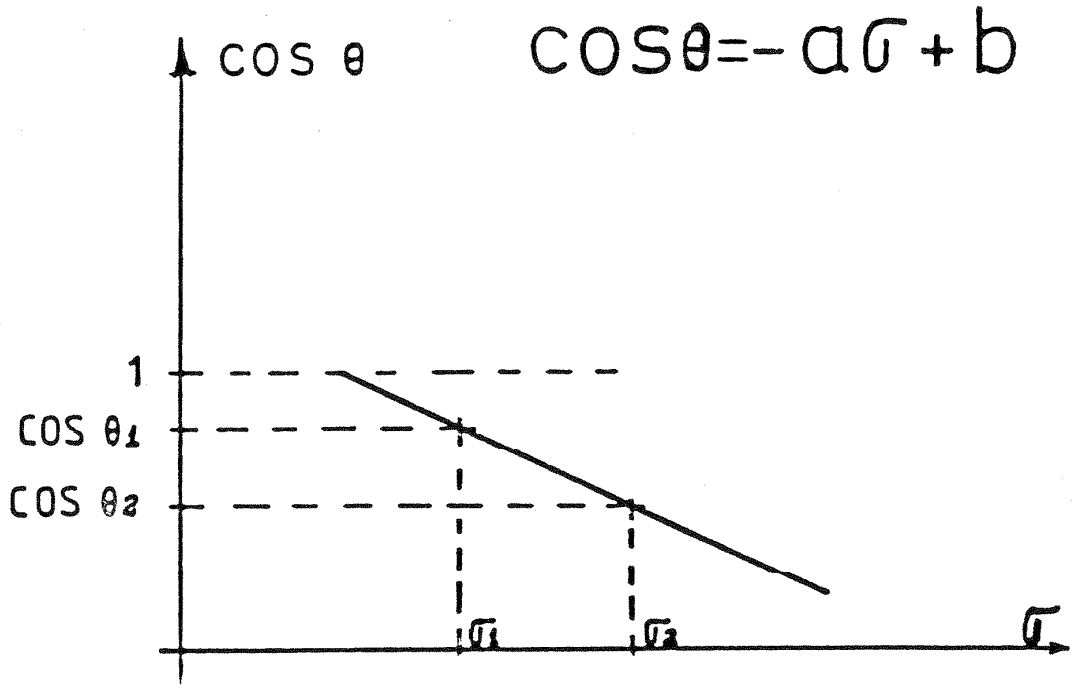


Fig. 2.2 - *Variação do ângulo de contacto com a tensão superficial*

A aderência entre uma cola e um sólido depende, ainda, do estado da superfície do segundo. Com efeito, a aderência mecânica entre uma cola e uma superfície rugosa é melhor (mais resistente) que a que se verifica entre uma cola e uma superfície lisa. Esta diferença deve-se aos dois factos seguintes:

- uma cola penetra melhor numa superfície rugosa do que numa superfície lisa;
- a área de contacto cola-superfície rugosa é superior à área de contacto cola-superfície lisa.

Vejamos, agora, quais as forças de natureza química que intervêm quando se colocam em contacto dois corpos [17,18]. Surgem forças de ligação à escala molecular que podemos reunir em dois grupos gerais: ligações interatómicas e intermoleculares.

1 - Ligações interatómicas:

- Ligação metálica — livre troca de electrões entre os átomos dos metais;
- Ligação iónica — transferência de electrões de um átomo para outro;
- Ligação covalente — permuta de electrões entre os átomos;
- Ligação covalente dativa — empréstimo de electrões por um só átomo ao outro átomo.

2 - Ligações intermoleculares:

- Forças de Van der Waals ou de polarização — forças electrostáticas ou magnéticas entre moléculas dipolares;
- Forças de London ou de dispersão — forças electrostáticas ou magnéticas entre moléculas não polares.

Há, ainda, ligações intermoleculares mistas como as pontes de hidrogénio e as ligações coordenadas.

A intensidade das ligações à escala molecular avalia-se pelas energias de dissociação expressas em KJ/mol. As ligações interatómicas podem abranger desde fracas energias ($40 - 60\ KJ/mol$) até energias muito fortes como as do $Si - F$, $Si - H$, $Si - C$, etc. As forças de Van der Waals e as pontes de hidrogénio actuam com uma energia média (20 a 60 KJ/mol). As forças de London são as menos resistentes com energias de dissociação de apenas $4 - 8\ KJ/mol$.

De facto, para dissociar uma ligação covalente $C - C$ pelo calor, é necessária uma temperatura de cerca de $600°C$; a dissociação dos sais por volatilização ocorre somente acima de $450°C$; os óxidos mais refractários podem ser estáveis, como se sabe, até $3000°C$ ou mesmo mais (ligações fortes silício, carbono, etc.). Porém a dissociação das ligações secundárias intermoleculares na água, por exemplo, dá-se próximo ao seu ponto de ebulição e podem vencer-se estas forças, mesmo à temperatura normal, em compostos de associação polar relativamente fraca.

Nos fenómenos de coesividade e aderência e, de modo geral, em todas as interacções de superfícies, é muito importante o conhecimento da variação das energias com as distâncias actuantes, r (espaço que medeia entre os dois átomos). As forças primárias, características da adesão química, crescem e decrescem bruscamente quando r varia entre $0,1$ e pouco mais de $0,2$ nanómetros; enquanto as forças de Van der Waals e as ligações hidrogénio começam já a sentir-se para uma aproximação intermolecular de cerca de $0,5\ nm$ e alcançam a sua máxima eficiência (8 a 32 KJ/mol) cerca de $0,35$ e $0,3\ nm$, respectivamente (Fig. 2.3) [17].

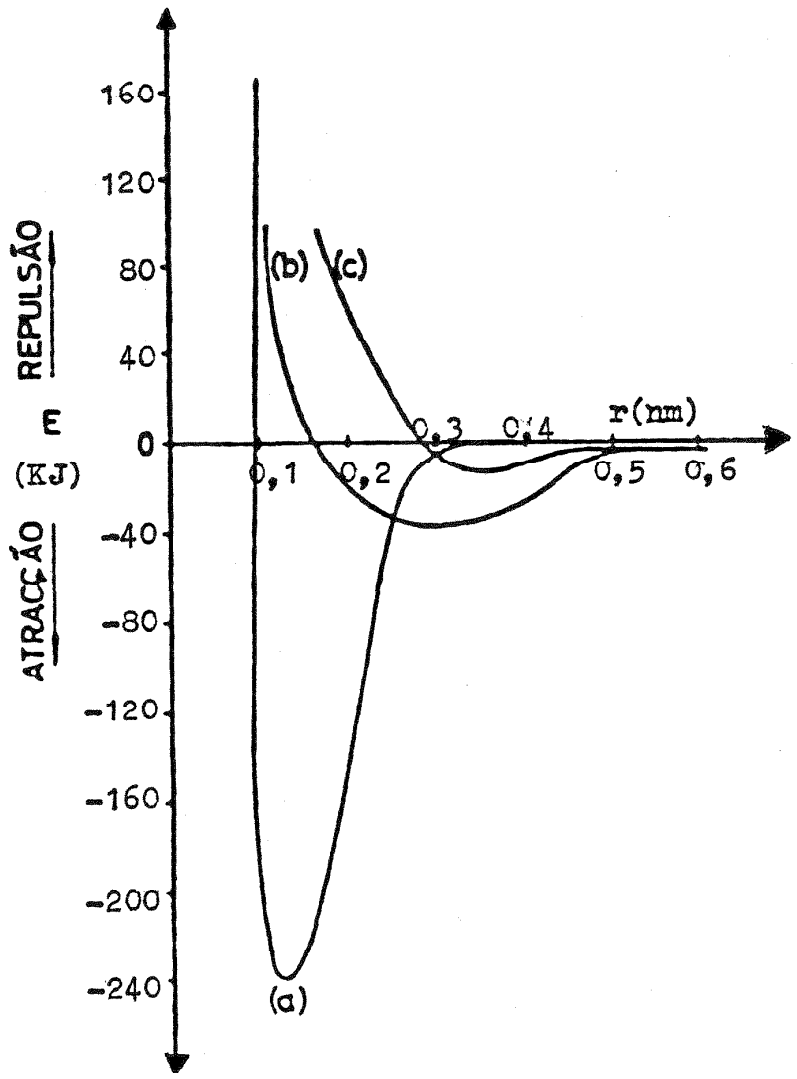


Fig. 2.3 - *Curvas de energia potencial de tipos diferentes de forças interatómicas: a) ligação covalente; b) ligação hidrogénio; c) ligação de Van der Waals.*

As forças secundárias electrostáticas são portanto pouco específicas e muito fracas em relação às forças químicas primárias covalentes, metálicas e iónicas. No entanto, as forças secundárias electrostáticas têm uma caracterítica primordial para os efeitos da adesão e da coesividade — a dimensão do seu campo de acção. A posição de equilíbrio r é, como se disse, da ordem de $0,3$ nm e a interacção decresce com r^{-n}, em que $2 \leq n \leq 7$, conforme o tipo de atracção em causa.

Há, ainda, as designadas forças residuais a longa distância. Recentemente desenvolveram-se teorias que predizem a interacção entre superfícies muito lisas, ou quase espelhadas, de quartzo. Observou-se que, de facto, pode ser possível a atracção até uma distância de cerca de 10^3 nm (embora muito fraca esta acção é

ainda mensurável e da ordem de 10^{-10} MPa). Outras experiências demonstram também diferenças capciosas nestas forças de longa distância entre moléculas não polares e entre moléculas polares. Com as primeiras podem construir-se camadas multimoleculares estáveis; enquanto que camadas semelhantes entre moléculas polares se tornam facilmente instáveis e se cindem em camadas monomoleculares ou diminutas gotículas. Estes factores podem muitas vezes explicar as influências aparentemente misteriosas que exercem certas impurezas na superfície dos aderentes; e são, também, de muita importância no domínio dos fenómenos tensio-activos, na estabilização de espumas, na formação espontânea de emulsões, etc. [17].

O significado real destas forças a longa distância nos fenómenos de aderência é sensivelmente o seguinte: os efeitos mensuráveis 10^2 nm são praticamente desprezíveis quando comparados com as forças de deformação mecânicas; para distâncias intermédias (digamos de 10 nm ou menos) podemos considerar uma subida (exponencial) das forças atractivas para valores de cerca de 10^{-1} MPa; e para maior aproximação um valor ainda superior. As interacções cola/aderente, por acção destas forças, podem começar portanto a distâncias relativamente grandes em comparação com as dimensões interatómicas, e o enfraquecimento da resistência das ligações — — devido a vazios e outras desigualdades entre as superfícies — é, talvez, um tanto limitado por este efeito benéfico das forças de dispersão a longa distância [19].

As ligações secundárias de atracção intermoleculares são as forças-base da coesividade dos materiais e da aderência específica entre as macromoléculas. As forças que actuam a longa distância têm, por si próprias, pouco significado para a energia da ligação e, por consequência, para a resistência adesiva; mas são muito importantes na formação dos estados coloidais, na orientação e alinhamento das macromoléculas e para certas características reológicas e de aplicação das colas.

Justamente porque as forças secundárias, de dispersão e de polaridade, podem responder pela resistência e versatilidade da maior parte das colas industriais — — principalmente se reforçadas com uma ou outra possível ligação primária nas malhas macromoleculares (nas colagens a quente) — não tem parecido necessário olhar para as forças de ligação primária, especificamente químicas, como fontes promotoras de adesão. Mas a última palavra na resistência e duração da força adesiva pode ser conseguida pelo uso judicioso de ligações químicas entre a substância colante e os aderentes a ligar. Mesmo nos casos de mais fácil reactividade, o número absoluto destas ligações é sempre relativamente pequeno, porque as distâncias e os ângulos das respectivas ligações terão de ser sempre satisfeitos e há, muitas vezes, impedimentos estéricos tanto na arquitectura molecular dos polímeros da cola como na organização da camada superficial monomolecular dos aderentes. No entanto, basta um pequeno reforço das forças atractivas secundárias, ou de Van der Waals,

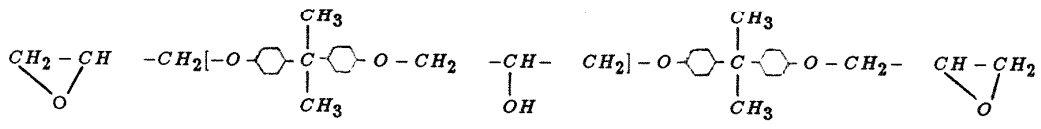
com uma ou outra ligação química primária, para que a força aderente aumente extraordinariamente. Por isso, a utilização deliberada de grupos químicos que possam reagir com os aderentes é um caminho muito promissor para melhorar a aderência. Na maior parte dos casos práticos — particularmente aqueles em que a durabilidade não é essencial —, a formação da aderência química não se torna necessária. Pode, até, considerar-se como um inconveniente por se tratar de um processo muito específico e especializado. Normalmente, a formulação de qualquer cola é um compromisso de interesses em que o custo é muitas vezes o mais importante. A utilização dos aditivos químicos reactivos, promotores de aderência, pelo seu alto custo, fraca estabilidade em armazém (vida curta) e grande selectividade relativamente ao tipo de aderente, é apenas justificável naqueles casos em que os materiais adesivos convencionais falhem para desenvolver a aderência suficiente. Nalguns casos é possível a reacção dos colantes com os materiais aderentes ou a reacção entre os próprios polímeros constituintes da cola. Estas reacções podem originar uma ou outra ligação química o que reforça imenso a força de aderência assim como a coesão intramolecular da própria película, dando uma colagem muito mais resistente e durável.

Para resumir o que ficou dito acerca das forças de ligação primárias e secundárias, entre moléculas e partículas actuantes, pode traçar-se um diagrama figurativo do conjunto de todas elas (Fig. 2.4) [17], considerando-as como dispostas sobre um tetraedro em que as ligações químicas primárias ocupam três dos vértices. No outro vértice supõe-se concentradas todas as forças secundárias de atracção electrostática ou magnética entre moléculas polares (forças de London e de Van der Waals). As ligações hidrogénio e coordenadas consideram-se casos particulares das forças de polarização e nas arestas do tetraedro podem supor-se situadas possíveis ligações intermoleculares mistas [17].

2.3 Epóxidos

Como já vimos no capítulo anterior, os epóxidos incluem-se no grupo dos polímeros termoendurecíveis, o que significa que não se podem fundir, nem dissolver sem que isso implique a sua degradação [8].

Mais de 90% dos epóxidos utilizados em engenharia civil são aromáticos e do tipo D.G.E.B.A. (diglicidilo éter bisfenol A) com uma estrutura molecular que se pode representar [17,20] da forma seguinte:



As forças atractivas secundárias são principalmente devidas aos agrupamentos polares do éter de glicidilo ($O - C H_2 - C\underset{\diagdown O \diagup}{H} - C H_2$) e aos grupos hidróxilo ($O H$) ao longo da cadeia. E por este motivo os epóxidos são essencialmente caracterizados por: índice de epóxido (número de grupos éter de glicidilo por kg de resina), índice de hidróxilo (número de grupos hidróxilo por kg de resina) e massa molecular. Verifica-se que a aderência dos epóxidos depende, sobretudo, do índice de epóxido, do índice de hidróxilo e da massa molecular destas colas.

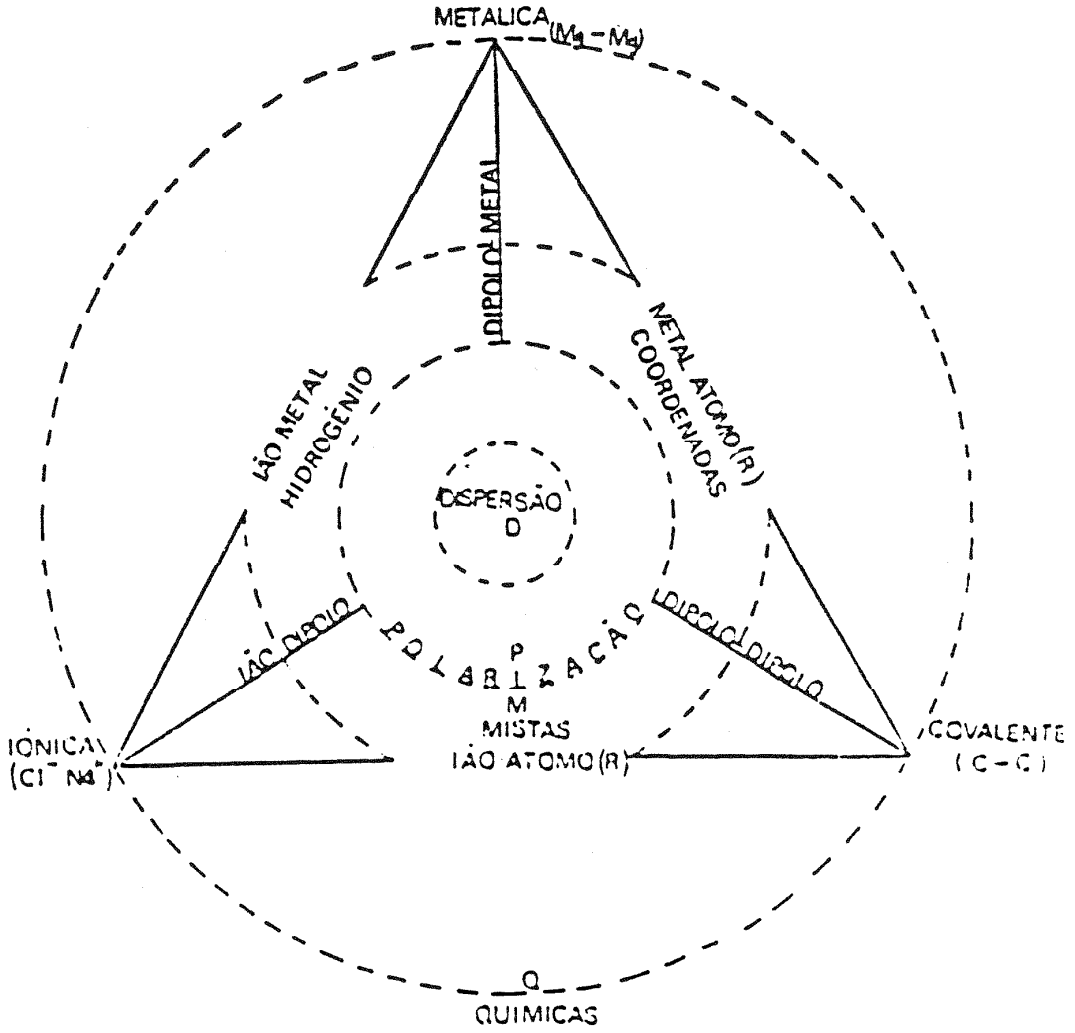


Fig. 2.4 - *Esquematização de ligações intra e intermoleculares*

As colas de epóxido são boas para ligar com variadas superfícies não excessivamente polares. Em certas situações é possível a reacção do epóxido com o aderente

dando origem a ligações químicas que reforçam a aderência. Isto verifica-se quando os grupos de éter de glicidilo se cindem e combinam com os grupos reactivos da superfície dos aderentes tais como metais, polímeros activados, vidro, cerâmicas e materiais siliciosos.

A polimerização de um epóxido dá-se após o contacto de dois constituintes que reagem entre si. Estes dois constituintes têm a designação de resina ou base e endurecedor. O endurecedor que é capaz de assegurar o endurecimento das resinas à temperatura ambiente (ou "a frio") é, geralmente, da família das poliaminas alifáticas e dos seus derivados (oligomeros e poliamidoaminas) e dos polisulfuretos. A sua junção à base dá origem a uma reacção de policondensação que leva à formação de macromoléculas através do agrupamento dos monómeros. Esta reacção dá-se com aumento de viscosidade e é exotérmica.

2.4 Propriedades dos epóxidos

Para além das propriedades comuns a todos os polímeros referidas no capítulo anterior, há certas características específicas dos epóxidos que convém reter neste capítulo porque estão muito relacionadas com as reparações e colagens de betões.

Como já vimos, a polimerização de um epóxido dá-se após o contacto da base com o endurecedor. A reacção inicia-se logo que se efectua a mistura dos constituintes e o utilizador dispõe de um espaço de tempo limitado para aplicar o material. Este espaço de tempo é designado por duração prática de utilização (D.P.U.) (Fig. 2.5) [8]. Ao fim deste tempo, que pode variar de alguns minutos a algumas horas, a viscosidade do produto aumenta bruscamente e a sua aplicação torna-se impossível.

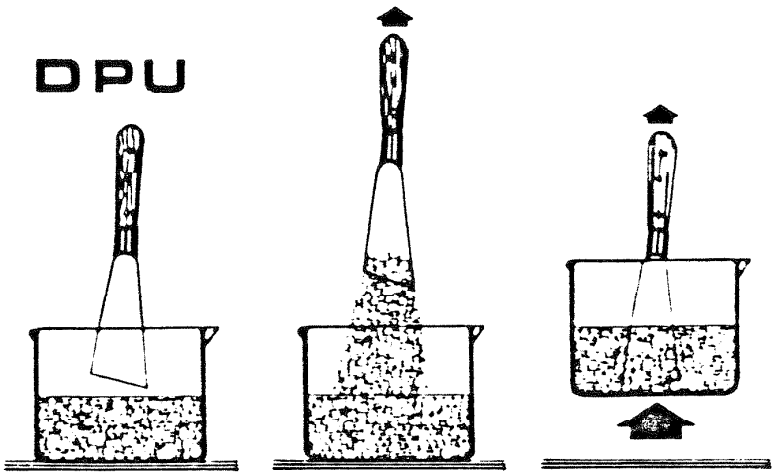


Fig. 2.5 - *Duração prática de utilização*

Convém distinguir bem, a noção de D.P.U. que depende apenas da natureza do sistema utilizado e da temperatura a que se encontra este, da noção de tempo de polimerização após aplicação em que intervém a temperatura do substrato e em menor escala a do ar ambiente e sobretudo os processos de aplicação.

Na realidade, se a mistura é deixada em massa (no recipiente, por exemplo) após a sua preparação, o calor originado pela reacção de polimerização não se pode libertar, a temperatura da mistura aumenta e a reacção autoacelera-se. O tempo de polimerização nestas condições é, assim, consideravelmente menor. Por outro lado, se a mistura é espalhada, adquire rapidamente a temperatura do substrato e a sua evolução prossegue, influenciada, também, pela temperatura ambiente. Portanto, é necessário atender às condições atmosféricas.

Finalmente, é necessário ter presente que a velocidade de endurecimento dos epóxidos sofre um decréscimo muito grande quando a temperatura é inferior a $5°C$. Por outro lado, a temperaturas desta ordem de grandeza a viscosidade das misturas é elevada o que torna difícil a aplicação assim como a molhagem das superfícies a cobrir. Este último ponto é importante porque uma molhagem defeituosa conduz a uma má aderência.

Não temos conhecimento de normas de ensaios para determinação da D.P.U.. Em [21] encontramos um projecto de norma que propõe a determinação de uma D.P.U. designada por convencional. O ensaio consiste em acompanhar a evolução da temperatura no interior de uma massa de $0,5\ kg$ de produto, após mistura dos constituintes, para determinar o instante a que corresponde um aumento brusco de temperatura que caracteriza a reacção de reticulação. Por definição, a duração prática de utilização é caracterizada pelo instante em que a curva de variação da temperatura em função do tempo se afasta $2°C$ da tangente à origem (Fig. 2.6).

Em muitos casos, os epóxidos não são utilizados puros, mas adicionados de diferentes produtos com vista a facilitar a aplicação do epóxido ou para obter produtos finais possuindo características bem definidas correspondentes a uma dada aplicação. Os aditivos utilizados podem agrupar-se da forma seguinte:

— os solventes que se destinam a facilitar a aplicação dos epóxidos diminuindo a sua viscosidade; pode distinguir-se entre solventes não reactivos (desaconselháveis em revestimentos espessos) e solventes reactivos que participam na reticulação;

— os plastificantes que se destinam a aumentar o alongamento à rotura dos epóxidos endurecidos e a diminuir a sua fragilidade; pode distinguir-se, igualmente, os plastificantes externos (geralmente esteres) que podem considerar-se

como cargas líquidas, dos plastificantes internos ou flexibilizantes, que participam na reticulação. É evidente que se a utilização dos solventes ou dos plastificantes se mostra necessária, os produtos reactivos são sempre preferíveis aos produtos não reactivos;

— os aceleradores que podem utilizar-se quando se pretende reduzir o tempo de cura ou assegurar uma reticulação mais completa do polímero; os aceleradores influenciam as propriedades físico-químicas dos produtos endurecidos, de forma diferente segundo a sua natureza;

— as cargas minerais que se utilizam frequentemente porque para além de diminuirem o custo do produto final têm vantagens técnicas tais como: diminuição da retracção e do coeficiente de dilatação linear, aumento da viscosidade, da D.P.U., das resistências mecânicas (excepto ao choque) e da resistência ao calor.

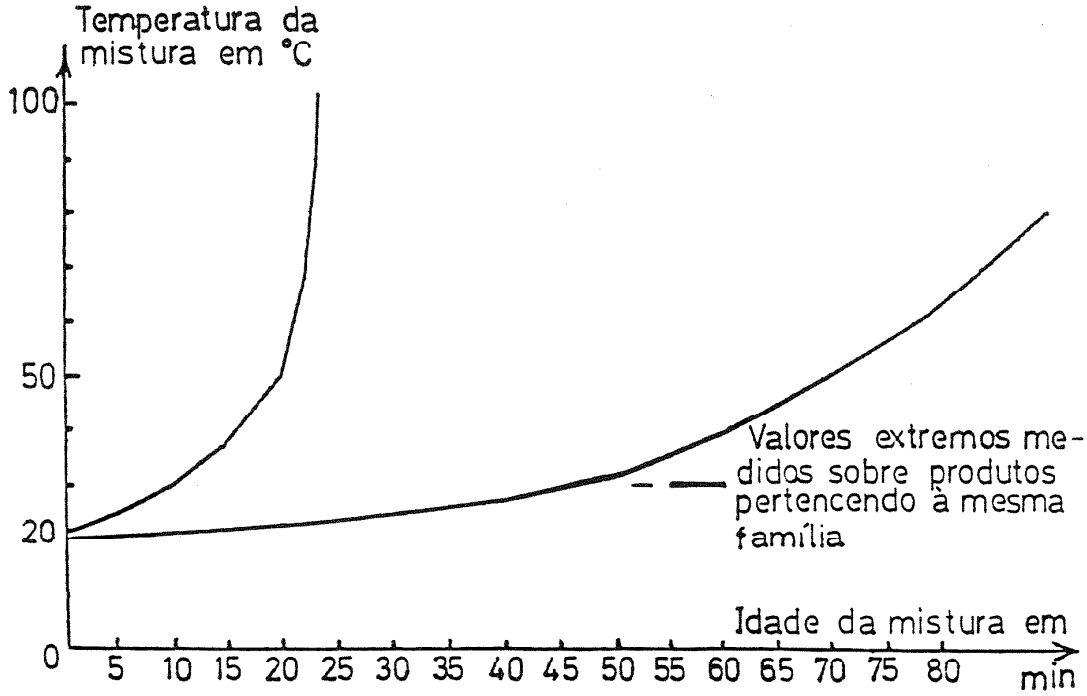


Fig. 2.6 - *Evolução da temperatura da mistura em função do tempo*

Como vimos no número anterior as bases epóxidas caracterizam-se essencialmente pela sua massa molecular e pelo índice de epóxido (ou equivalente epóxido). A viscosidade da base é tanto mais elevada quanto maior for a massa molecular. A base industrial mais corrente é de natureza aromática e tem um índice de epóxido próximo de cinco e uma viscosidade de aproximadamente 12 $Pa.s$ a 25°C.

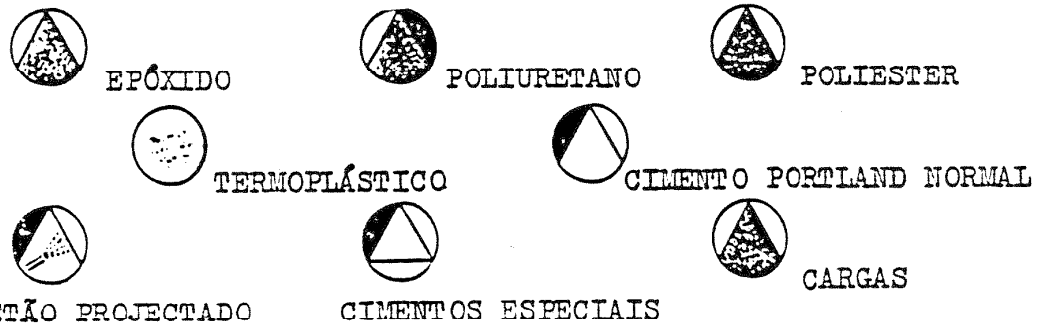
A escolha do endurecedor é determinante quanto à possibilidade de um epóxido endurecer de forma satisfatória em meio húmido. Aliás, é corrente utilizarem-se vários endurecedores associados para se obter o polímero com as propriedades mais convenientes.

2.5 Reparações externas

2.5.1 Produtos a utilizar

Nas páginas seguintes apresentam-se fichas, obtidas de [8], que permitem a escolha dos produtos a utilizar em cada problema relativo à degradação do betão.

O código dos produtos utilizáveis, que se apresentam nos quadros seguintes é:



Conforme se pode constatar nestas fichas os epóxidos são os materiais de maior aplicação nos casos apresentados.

2.5.2 Condições de utilização dos produtos

2.5.2.1 Revestimentos superficiais de espessura inferior a 2 *cm*

2.5.2.1.1 Preparação das superfícies a reparar

No Quadro 2.1 mostram-se as características principais dos epóxidos utilizados em revestimentos superficiais de espessura inferior a 2 *cm*.

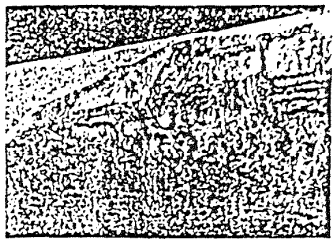
Para que uma reparação tenha êxito, deve antes de mais prestar-se atenção ao modo de preparação do suporte betão. Para isso é necessário:

- eliminar todo o betão degradado até ao betão são;
- eliminar a totalidade de óleos e eventuais gorduras;
- eliminar a leitada de cimento e os eventuais produtos de cura para betões e argamassas hidráulicos;

PROBLEMA

Armadura de betão armado aparente

Não há corrosão das armaduras



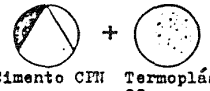
REPARAÇÃO

Reconstituição do betão

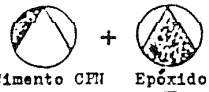
Produtos Utilizáveis

Epoxido

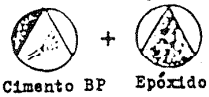
Poliuretano



Cimento CPN + Termoplástico



Cimento CPN + Epóxido



Cimento BP + Epóxido

Cimento CPN

Cimento CE

EXECUÇÃO

-Argamassa (ligante epóxido ou poliuretano) sobre camada de aderência em epóxido ou poláuretano.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+emulsão de polímero termoplástico sobre camada de aderência em ligante epóxido ou sobre leitada de cimento.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+ligante epóxido sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-No estado actual dos nossos conhecimentos utiliza-se sem camada de aderência.

-Argamassa ou betão de cimento aluminoso sobre camada de aderência em epóxido.

-Argamassa ou betão de cimento Portland sobre camada de aderência em epóxido.

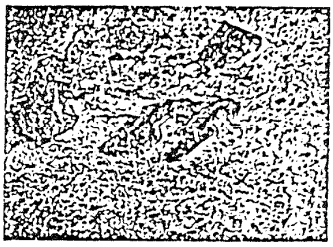
PRODUTOS DESACONSELHADOS

-Polímeros termoplásticos

PROBLEMA

Armadura do betão armado aparent

Marcas de ferrugem



REPARAÇÃO

Limpar armaduras corroídas com escova, água sob pressão...

Armadura corroída

REPARAÇÃO

Selar armaduras para reforço d betão armado.
Reconstituição do betão.

Produtos Utilizáveis

Epóxido

Cimento BP

Epóxido

Cimento BP

EXECUÇÃO

-Ligante ou argamassa epóxido sobre camada de aderência em ligante epóxido..

-Betão projectado. Retirar com cuidado marcas de ferrugem ou de gordura. Ficar de novo o betão para obter uma boa aderência.

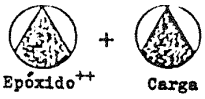
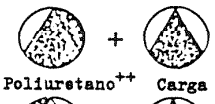
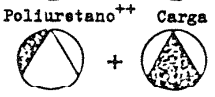
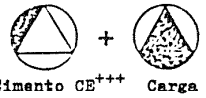
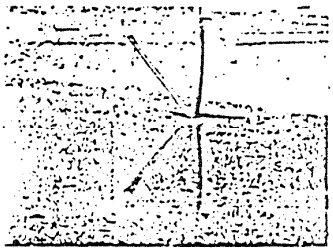
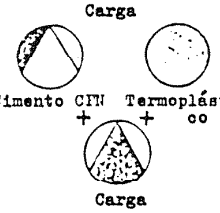
-Ligante ou argamassa epóxido sobre camada de aderência em ligante epóxido. Reparação a executar se possível abrigada da água.

-Betão projectado.

PRODUTOS DESACONSELHADOS

-Polímeros termoplásticos

Os produtos de reconstituição do betão devem ser estudados e ensaiados antes de qualquer reparação.

PROBLEMA	Produtos Utilizáveis	EXECUÇÃO
SEGREGAÇÃO **Cavidades ou efeito de parede** REPARAÇÃO Tapar cavidades	 Epóxido^{++} + Carga  Poliuretano^{++} + Carga  Cimento CPN + Carga  Cimento CE^{+++} + Carga	-Sobre camada de adorência em epóxido puro. -Sobre camada de aderência em epóxido puro ou poliuretano (meio seco). -Sobre camada de aderência em epóxido. -Sobre camada de aderência epóxida.Para o cimento expansivo,há necessidade de efectuar a reparação sobre um suporte perfeito.
vazios importantes  REPARAÇÃO Reconstituição da superficie	 Cimento CPN + Epóxido + Carga	-camada de aderência em epóxido.
Vazios superficiais resultando da segregação do betão. REPARAÇÃO Rebocos superficiais	 Cimento CPN + Termoplástico + Carga	-Sobre camada de aderência em epóxido ou sobre leitada, no caso da argamassa.

PRODUTOS DESACONSELHADOS	
-Polímeros termoplásticos	+ Verificar que o vazio é realmente superficial. ++ Contra-indicação: Desaconselhado para reparações de betão pré-esforçado antes do tensionamento. - atenção á retracção dos ligantes hidráulicos e aos coeficientes de dilatação térmica dos polímeros termocondurecíveis. +++ Os ligantes expansivos não devem conter agentes agressivos para as armaduras(reparação dos betões armados ou pre-esforçados).

PROBLEMA

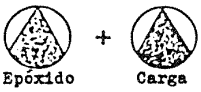
CORROSÃO DO BETÃO

Corrosão superficial

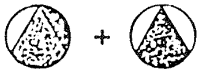
REPARAÇÃO

Eliminar o betão degradado e reconstituir o betão.

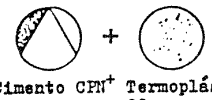
Produtos Utilizáveis



Epóxido + Carga

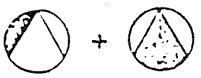


Poliuretano + Carga



Cimento CPN^{+} + Termoplástico

Cimento CE^{+}



Cimento CPN^{+} + Epóxido

Cimento CPN^{+}

EXECUÇÃO

-Argamassa epóxida ou de poliuretano sobre camada de aderência em ligante epóxido ou poliuretano (meio seco).

-Argamassa ou betão de cimento Portland+emulsão de polímero termoplástico sobre camada de aderência em ligante epóxido ou sobre leitada.

-Argamassa de cimento aluminoso^{++}

-Argamassa ou betão de cimento Portland+ligante epóxido sobre camada de aderência em ligante epóxido ou leitada.

-Sobre camada de aderência em ligante epóxido.

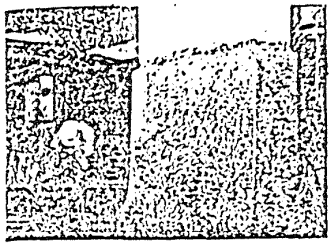
PRODUTOS DESACONSELHADOS

+ Caso seja utilizado betão ou argamassa de cimento Portland este deve resistir ás águas agressivas.
Em qualquer caso, anular completamente as águas em contra-pressão antes de realizar o revestimento de protecção ou impermeabilização.

++ O cimento aluminoso é particularmente estável perante as águas agressivas. Deve ser utilizado segundo as normas.

PROBLEMA

PROTECÇÃO CONTRA A CORROSÃO DO BETÃO



REPARAÇÃO

Revestimento de protecção e de impermeabilização.
Executar obrigatoriamente antes da colocação do edifício em serviço.

Produtos Utilizáveis

Epóxido

Poliuretano

Cimento CPN Termoplástico

Poliester

EXECUÇÃO

-Utilizar sistemas de pintura sobre betão+

-Ligante, argamassa ou pintura poliester segundo processos registados para cubas(independentes do suporte).

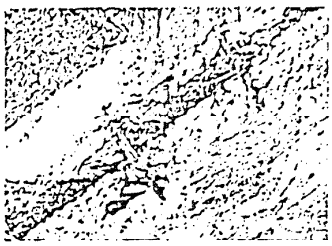
PRODUTOS DESACONSELHADOS

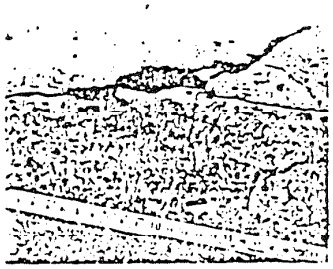
+ Utilizar uma camada de acabamento em poliuretano quando se desejar um bom comportamento aos ultravioletas.

PROBLEMA

CORROSÃO DO BETÃO

Destaque do betão

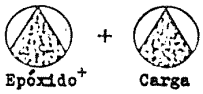




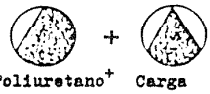
REPARAÇÃO

Reconstituição da superfície do betão e dos ângulos.

Produtos Utilizáveis



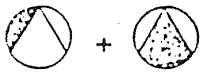
Epóxido+ **Carga**



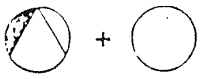
Poliuretano+ **Carga**

Cimento CPN++

Cimento CE++



Cimento CPN **Epóxido**



Cimento CPN Termoplástico

EXECUÇÃO

-Ligante epóxido carregado,ou argamassa sobre camada de aderência epóxida.

-Ligante poliuretano,carregado ou argamassa sobre camada de aderência em epóxido ou isocianeto (meio seco).
Reparação abrigada da água.

-Argamassa ou betão hidráulico sobre camada de aderência em epóxido.

-Argamassa ou betão aluminoso sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+ligante epóxido sobre camada de aderência em epóxido.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+emulsão de polímero termoplástico sobre camada de aderência em epóxido ou sobre leitada.

PRODUTOS DESACONSELHADOS

-Polímeros termoplásticos

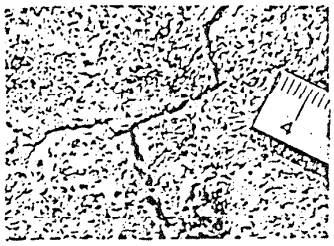
\+ Atenção aos coeficientes de dilatação térmica dos polímeros termoendurecíveis.

++ Atenção á retracção dos ligantes hidráulicos

PROBLEMA

FISSURAS SUPERFICIAIS(e < 0,6mm)

Suporte horizontal



REPARAÇÃO

Eliminação das fissuras

Suporte vertical

REPARAÇÃO

Eliminação das fissuras

Aplicação de uma ou mais camadas.

Produtos Utilizáveis

Epóxido+

Poliester

Termoplástico

Epóxido ou Poliuretano + Carga

Termoplástico

Cimento CPN++

Cimento CPN + Epóxido

Cimento CPN + Termoplástico

EXECUÇÃO

-Ligante epóxido fluido

-Poliester de fraca retracção para fissuras de largura<0,2mm

-Pilme flexível sobre suporte não solicitado,resistente ás micro-fissuras.

-Ligante epóxido ou poliuretano+ cargas tixotrópicas. Reparação abrigada da água para o poliuretano.

-Pilme flexível,sobre suporte não solicitado,resistente ás micro-fissuras.

-Argamassa hidráulica sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-Argamassa +ligante epóxido sobre camada de aderência em epóxido.

-Argamassa+polímero termoplástico sobre camada de aderência em epóxido ou sobre leitada.

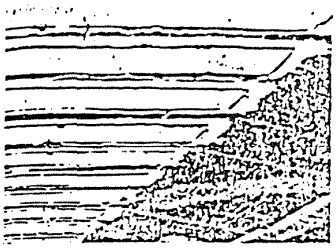
PRODUTOS DESACONSELHADOS

+ Caso não haja meios mais apropriados, pode-se aplicar a resina muito fluida sem solvente,com o pincel sobre as fissuras, repetindo a operação varias vezes.

++ Atenção á retracção dos ligantes hidráulicos.

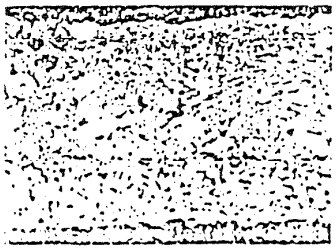
PROBLEMA

CAPACIDADE DE CARGA DA OBRA INSUFICIENTE



REPARAÇÃO
Realizar estudo próprio

Reforço da estrutura



REPARAÇÃO
Realizar estudo próprio

Produtos Utilizáveis

Epóxido

Cimento BP

EXECUÇÃO

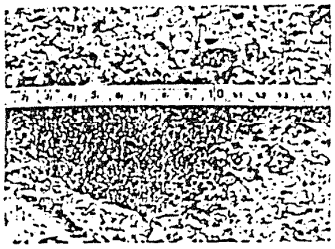
-Colar placas metálicas

PRODUTOS DESACONSELHADOS

PROBLEMA

MECÂNICA

Buraco no betão



REPARAÇÃO

Tapar os buracos.

Produtos Utilizáveis

Epóxido + Carga

Poliuretano + Carga

Cimento CPN+

Cimento CE++

Cimento CPN + Epóxido

Cimento CPN Termoplástico

EXECUÇÃO

-Argamassa ou betão em ligante epóxido sobre ligante epóxido (camada de aderência)

-Argamassa ou betão em ligante poliuretano sobre camada de aderência em ligante epóxido ou isocianeto(meio seco). Reparação abrigada da água e das chuvas.
-Argamassa ou betão hidráulico sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-Argamassa ou betão de ligante expansivo sobre camada de aderência em ligante epóxido. Argamassa ou betão de cimento aluminoso sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+ligante epóxido sobre camada de aderência em ligante epóxido.

-Argamassa ou betão de cimento Portland+emulsão de polímero termoplástico sobre camada de aderência em ligante epóxido ou leitada de aderência.

PRODUTOS DESACONSELHADOS

-Polímeros termoplásticos

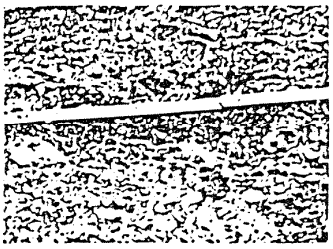
\+ Atenção á retracção dos ligantes hidráulicos

++ Os ligantes expansivos não devem conter agentes agressivos para as armaduras(reparações do betão armado ou pré-esforçado).

PROBLEMA

MECÂNICA

Desgaste superficial do betão



REPARAÇÃO

Revestimentos superficiais sobre pavimentos ou lajes de betão não revestidas.*

Revestimentode pavimentosindustriais e revestimentos anti-desgaste.**

Produtos Utilizáveis

Epóxido^{+++} + Carga

Poliuretano^{+++} + Carga

Epóxido^{+++} + Carga

Poliuretano^{+++}

Cimento CPN

Cimento CE

EXECUÇÃO

-Reparações abrigadas da água e das chuvas.

-Argamassa epóxida em poliester, camada de aderência de espessura suficiente em ligante epóxido ou isocianeto(meio seco).Reparações abrigadas da água.

-Argamassa hidráulica+granulados especiais,resistindo ao desgaste sobre camada de aderência em ligante epóxido.

PRODUTOS DESACONSELHADOS

* Revestimentos superficiais á base de ligantes betuminosos

** Informação dada a titulo indicativo.

*** Atenção ao coeficiente de dilatação termico dos polímeros termoendurecíveis.

QUADRO 2.1

Características principais dos epóxidos utilizados em revestimentos superficiais de espessura inferior a 20 *mm*

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS EPÓXIDOS		PUROS OU CARREGADOS	ARGAMASSAS
ADERÊNCIA SOBRE SUPORTE	seco	boa	Necessita uma camada de aderência em ligante epóxido bem formulado
	húmido	Depende de formulação	
COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA		Muito superior ao dos ligantes hidráulicos	Superior ao das argamassas hidráulicas. Depende da carga e da % de ligante ($20a30.10^{-6}\,°C^{-1}$)
TIXOTROPIA		Nula sem cargas minerais	Depende da natureza e da % de carga
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS		Superior aos ligantes hidráulicos	Superior às argamassas hidráulicas. Depende da dosagem do ligante
MÓDULO DE ELASTICIDADE		1 a 3 GPa	10 a 30 GPa
FLUÊNCIA (a título indicativo)		Muito importante	A 20°C análoga à das argamassas hidráulicas. A 50°C muito superior.
RETRACÇÃO DA POLIMERIZAÇÃO		Fraca	Inferior à das argamassas hidráulicas.

- eliminar a ferrugem das armaduras.

A eliminação do betão degradado deve efectuar-se por um dos processos seguintes: aplainamento (Fig. 2.7), com martelo pneumático (Fig. 2.8), por jacto de areia (Fig. 2.9) ou por jacto de água sob forte pressão (Fig. 2.10). A utilização de martelo pneumático (mesmo ligeiro) não é de aconselhar porque se trata de um método muito possante. O seu uso só será de admitir em peças de grandes dimensões [22]. O corte térmico pode ser interessante em certos casos particulares.

A utilização de solventes para desengordurar o betão não é aconselhável. Estes diluem os óleos e gorduras que ficam em seguida distribuídos em fina película sobre a superfície do betão.

A eliminação da ferrugem nas armaduras deve efectuar-se com escova metálica (Fig. 2.11) ou por jacto de areia, de modo a retirar tudo o que pode ser nocivo a uma boa aderência.

Um jacto de ar comprimido ou de preferência uma aspiração são sempre necessários para retirar as poeiras e terminar a limpeza (Fig. 2.12).

Antes da aplicação do produto de reparação deve inspeccionar-se todas as superfícies de betão, verificando se elas estão em boas condições e apresentam os

inertes grossos descobertos.

Todas as superfícies de betão devem estar secas a não ser que seja utilizado um epóxido insensível à água. A temperatura da superfície deve ser pelo menos de $5°C$ para permitir o espalhamento do ligante oú argamassa de epóxido sobre a superfície de betão e não impedir o normal desenvolvimento da reacção de polimerização.

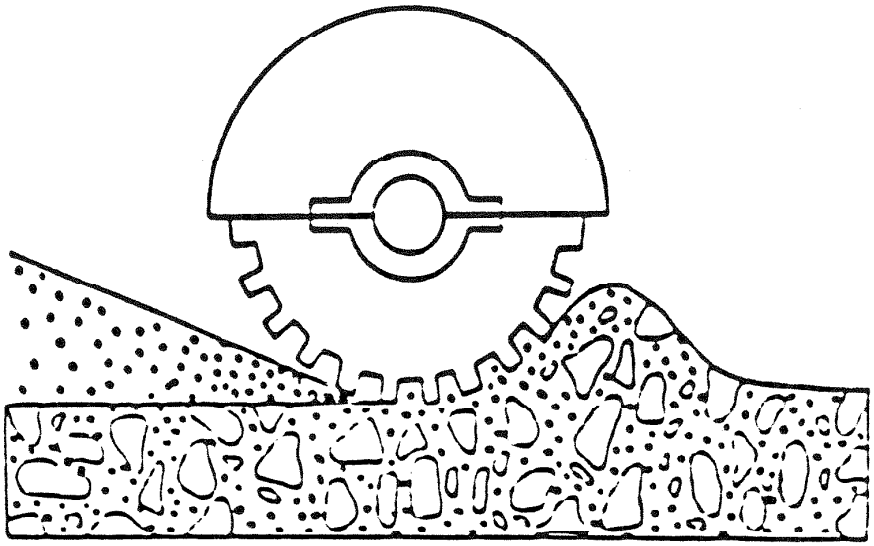


Fig. 2.7 - *Aplainamento*

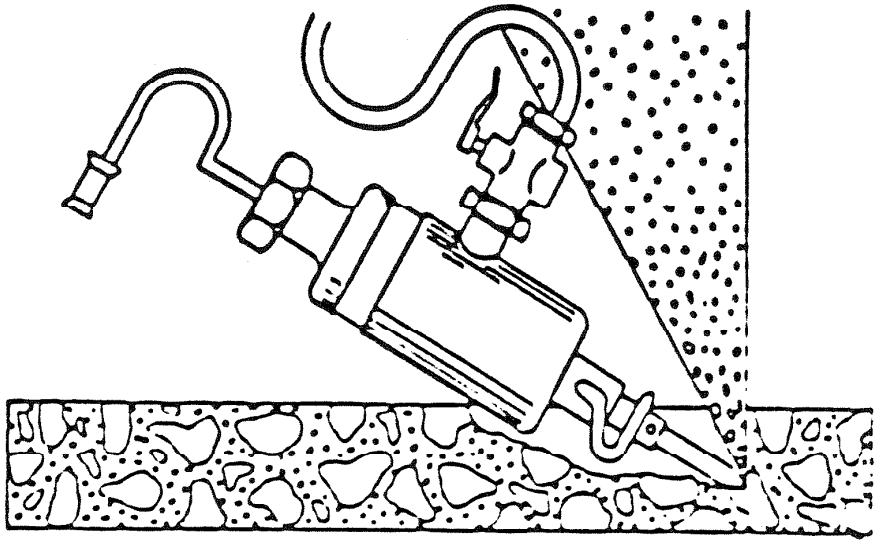


Fig. 2.8 - *Com martelo pneumático*

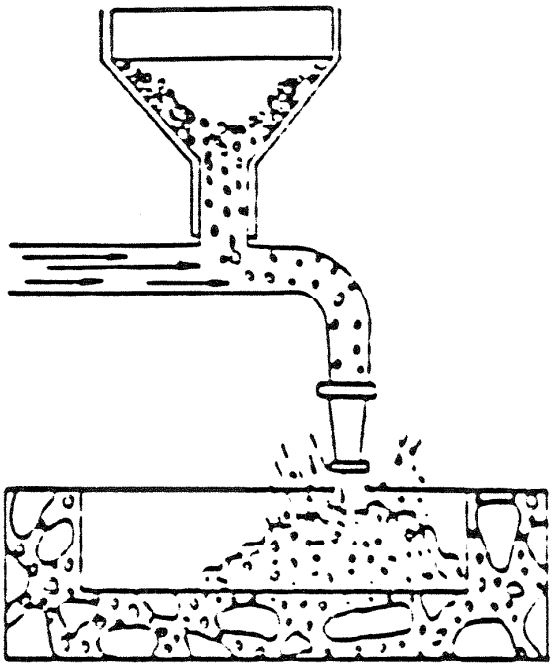


Fig. 2.9 - *Por jacto de areia*

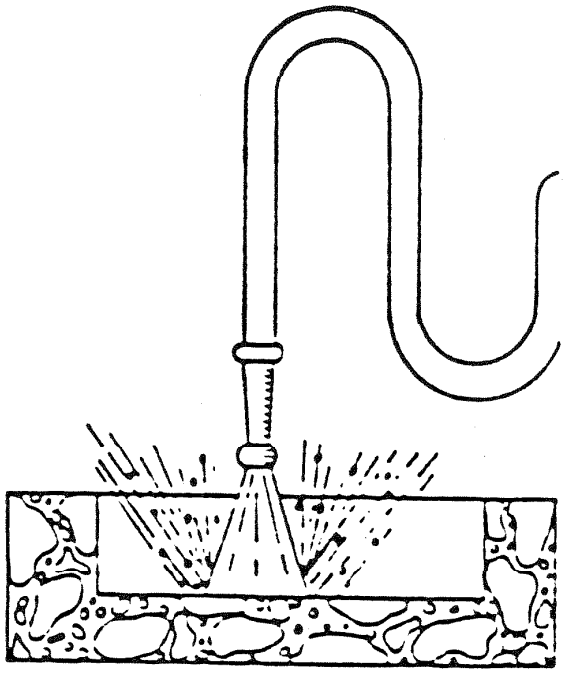


Fig. 2.10 - *Por jacto de água sob forte pressão*

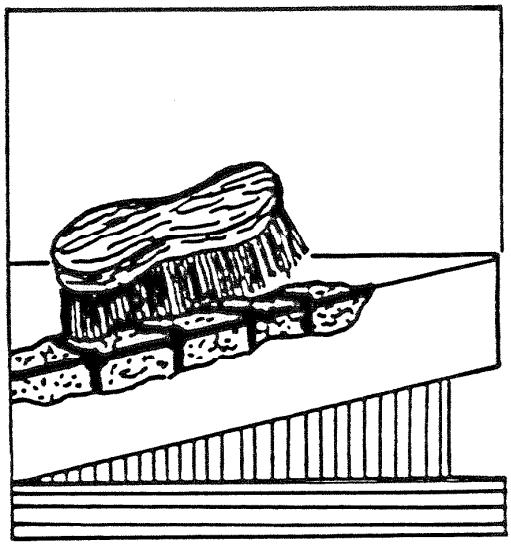


Fig. 2.11 - *Eliminação da ferrugem com escova metálica*

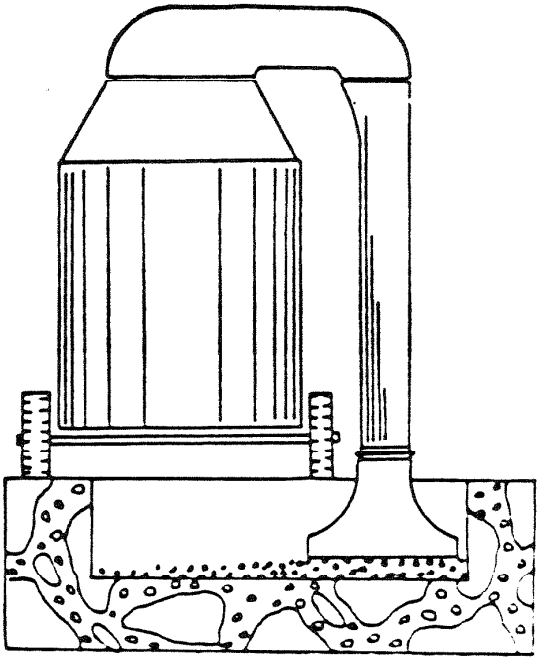


Fig. 2.12 - *Desempoeiramento por aspiração*

Deve avaliar-se o teor de humidade do betão, determinando se essa humidade se concentrará na zona de ligação entre o betão endurecido e o ligante ou argamassa de epóxido antes de estes terem endurecido. Isto pode ser determinado [23,24,25,26]

envolvendo a superfície do betão com uma capa de polietileno. Se a humidade se concentrar no interior da capa de polietileno antes do tempo que seria necessário para a cola ou argamassa de epóxido endurecerem, dever-se-á permitir ao betão que seque o suficiente para impedir que uma barreira de humidade se possa vir a formar entre o betão endurecido e a cola ou argamassa de epóxido.

As exigências de uma suficiente fluidificação do ligante, conveniente preparação das superfícies a reparar e condições adequadas de secagem e endurecimento do polímero tem a ver com a necessidade de assegurar as distâncias mínimas entre as macromoléculas dos epóxidos e as moléculas superficiais dos materiais aderentes para que se desenvolvam as forças de aderência. Tem de haver a possibilidade de difusão, orientação e alinhamento das cadeias macromoleculares dos polímeros na ligação polímero-betão. Isto leva a que para além de aspectos de natureza química, como as polaridades do polímero e do betão, sejam considerados aspectos de carácter físico como os relacionados com a penetração dos líquidos nos poros e capilares de um sólido, tais como a viscosidade, o poder de molhagem da cola, o ângulo de contacto entre o polímero e o betão, o estado de superfície do betão e a forma e dimensão dos poros e capilares do betão em que o epóxido deve penetrar [17]. Todos estes aspectos são importantes e contribuem para facultar a necessária aproximação e orientação das moléculas que é indispensável para o desenvolvimento das forças de aderência entre o epóxido e o betão.

2.5.2.1.2 Camada de aderência em epóxido

De um modo geral, a camada de aderência é constituída por uma camada ou filme de pequena espessura de epóxido puro e por uma camada de 2 a 3 mm de epóxido com cargas minerais.

Como a primeira camada deve ser uma película de polímero puro é conveniente que o betão esteja seco. Um jacto de ar comprimido, isento de óleos e de humidades, antes da aplicação do filme de epóxido pode ser suficiente.

Deve ter-se a certeza que o produto proposto não contém solvente. Com efeito, riscos de endurecimento incompleto, de descolagem e de formação de bolhas de ar são de temer no caso da retenção de solvente no betão.

Por outro lado, um bom conhecimento das condições de aplicação é necessário para a escolha do produto de colagem. Pois as condições de aplicação são influenciadas pela temperatura, massa de produto a preparar e humidade do suporte.

Cada formulação epóxida tem uma temperatura mínima de utilização abaixo da qual a reacção de polimerização é incompleta ou inexistenete. Em geral, esta temperatura é próxima de $10°C$ para os epóxidos. Existem produtos especiais utilizáveis até $0°C$ mas acarretam geralmente o inconveniente de se tornarem frágeis após endurecimento.

Em tempo frio, pode aquecer-se os constituintes do epóxido mas convém notar que o produto aplicado toma muito rapidamente uma temperatura próxima da do suporte e que o endurecimento se produz, excepto se houver precauções particulares, à tempera ambiente.

Cerca dos $10°C$ ou após um armazenamento prolongado, o constituinte base pode cristalizar e tornar-se sólido. Apesar de quimicamente intacto, não é utilizável neste estado físico. Neste caso, convém efectuar as seguintes operações:

- aquecer a base em banho-maria a menos de $50°C$ até à fusão completa dos cristais (é totalmente desaconselhado aquecer directamente a base) (Fig. 2.13);
- arrefecer a base antes de a misturar com o endurecedor para dispor do prazo normal de aplicação à temperatura ambiente.

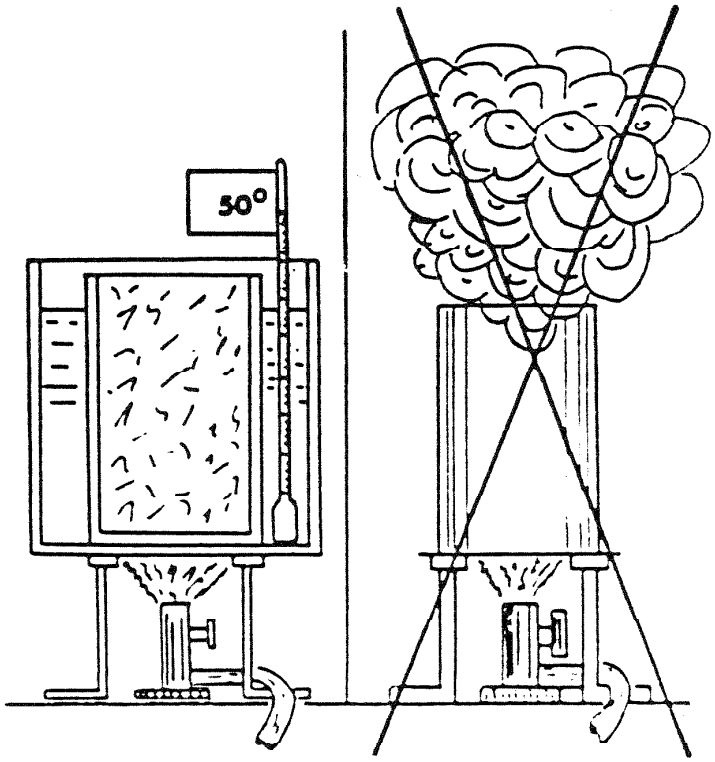


Fig. 2.13 - *O aquecimento da base deve fazer-se em banho-maria.*

De igual forma o constituinte endurecedor pode ter decantado ou engrossado. Uma homogeneização prévia é indispensável antes da mistura com a base.

Sobretudo em tempo quente é indispensável conhecer a duração prática de utilização (D.P.U.) do epóxido, condicionada pela sua embalagem ($1, 2$ ou $5\,kg$) porque a reacção de polimerização é exotérmica e é acelerada quando a massa de polímero a preparar aumenta.

Em qualquer caso, o produto proposto só é utilizável se a D.P.U. do epóxido em embalagem for superior ao tempo de preparação e de aplicação nas condições da obra.

As embalagens que contêm os constituintes devem estar convenientemente rotuladas, para se evitarem possíveis confusões. Os rótulos devem conter informações sobre o nome do fabricante, a identificação do produto, instruções para a sua mistura, cuidados a ter com o seu manuseamento e como evitar intoxicações. Por outro lado, as embalagens devem estar bem fechadas para evitar a deterioração dos produtos. O manuseamento deve realizar-se de maneira segura e de forma a evitar a quebra do lacre das embalagens.

A armazenagem das embalagens deve efecuar-se em local arejado e fresco e o material destinado à mistura dos constituintes deve proteger-se do sol.

Deve distinguir-se quatro estados de superfície do betão que vai receber a camada de epóxido:

- superfície seca;
- superfície húmida;
- superfície escorrendo água;
- superfície imersa (colagem sob água).

A superfície seca é a que conduz às melhores aderências mas encontra-se raramente nas obras. A superfície húmida é admissível para certos epóxidos. A superfície escorrendo água dá muito frequentemente resultados decepcionantes mas a colagem sob água é possível com certos epóxidos. Esta última constitui um caso particular e obriga sempre a um estudo prévio em laboratório para assegurar a eficácia do produto proposto.

Antes de se efectuar a mistura da base com o endurecedor, deve homogeneizar-se o conteúdo de cada um dos recipientes em que são fornecidos.

Deve respeitar-se rigorosamente as proporções da mistura tendo o cuidado de não deixar nada no fundo das embalagens. Com efeito, as resistências mecânicas encontram-se perturbadas quando se altera a percentagem de endurecedor relativamente à base. Assim, é desejável a utilização de produtos condicionados em recipientes dispondo de tampas de abertura total. Isto é indispensável se se utilizarem epóxidos com cargas, de consistência pastosa.

Para obter uma melhor dissipação do calor de reacção e por conseguinte um aumento da D.P.U., é desejável virar o conteúdo dos recipientes que contêm a base e o endurecedor num outro recipiente de fundo plano (gamela de trolha de borracha, por exemplo) cujas dimensões permitam a obtenção de uma espessura de produto final tão pequena quanto possível. Efectuar-se-á a mistura até se obter uma cor e consistência muito homogénea.

A mistura dos componentes do epóxido deve efectuar-se num recipiente e com ferramentas limpas e secas. Para evitar confusões, em obra, é aconselhável que as embalagens contenham as quantidades certas de resina e de endurecedor a misturar entre si.

Para os ligantes fluidos, a mistura pode efectuar-se com um agitador de palhetas rodando a velocidade lenta (3 a 5 Hz) para evitar pôr o ligante em emulsão (criação de bolhas provenientes de uma inclusão de ar).

Para as misturas de consistência pastosa pode utilizar-se um agitador de hélice, uma espátula ou uma colher de trolha. Se se usar espátulas ou métodos análogos devem misturar-se quantidades pequenas (até 1 litro).

De qualquer forma, os dois compostos a misturar devem ser de cores diferentes de modo a que se possa controlar a sua homogeneização.

Na maioria dos casos, convém respeitar um período de amadurecimento da mistura antes da aplicação. Este tempo que corresponde ao início da reacção de adição entre os componentes deve ser referido na ficha técnica de identificação do produto.

Com efeito, os filmes aplicados muito cedo após a mistura dos dois constituintes, antes de se esgotar o tempo de amadurecimento, conduzem ao aparecimento de diferenças de tonalidade que correspondem ao início de separação de fases. A polimerização é nesse caso insuficiente e o filme não atinge as suas resistências óptimas.

A aplicação do epóxido sobre o suporte betão endurecido deve efectuar-se à escova, pistola, pincel ou espátula, segundo a viscosidade do produto utilizado. Caso a aplicação se faça à pistola é aconselhável passar uma escova ou uma espátula grosseira e terminar com uma espátula lisa. Deve terminar-se a aplicação antes que a viscosidade da mistura fique muito elevada e a aplicação se torne muito difícil, porque nesta fase o suporte fica mal molhado e surgem vazios na interface que provocam má aderência.

Se a superfície de aplicação é inclinada, vertical ou horizontal invertida deve utilizar-se um epóxido tixotrópico para evitar que escorra.

2.5.2.1.3 Argamassa ou betão de epóxido

A sua aplicação deve efectuar-se quando a camada de aderência aplicada sobre o

suporte de betão fique viscosa (formação de um início de gelificação). A preparação da argamassa ou do betão de epóxido deve efectuar-se da seguinte forma:

- mistura dos constituintes do epóxido à parte e nas condições referidas no número anterior;
- introdução dos inertes no misturador que serve para a preparação da argamassa ou do betão (Fig. 2.14);
- introdução do epóxido no misturador em rotação e mistura até à obtenção de uma pasta homogénea.

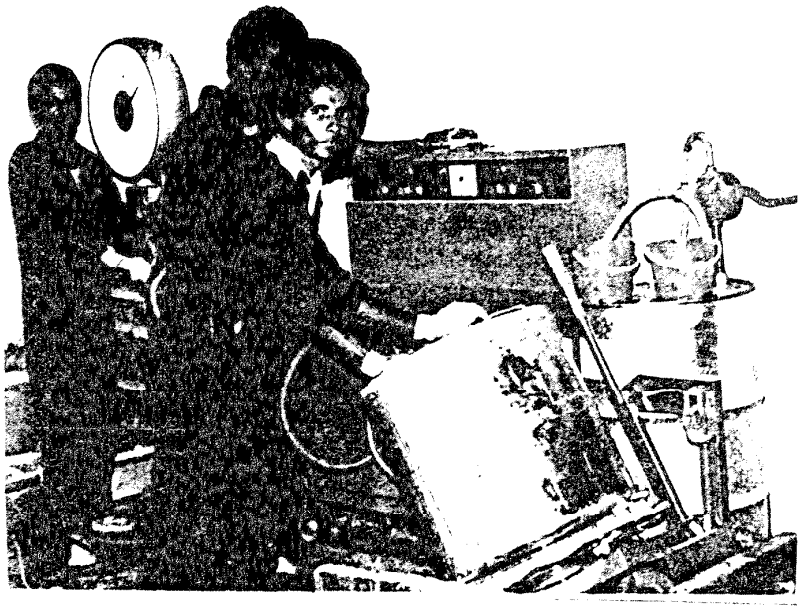


Fig. 2.14 - *Misturador para epóxidos com capacidade de 70 litros*

Convém não utilizar betoneiras na preparação das argamassas ou betões de epóxido, porque não permitem a obtenção de uma mistura íntima entre o epóxido e os inertes.

A mistura deve ser muito eficaz para evitar que fiquem grânulos de epóxido na argamassa ou betão. A utilização de um misturador de cuba móvel cujas palas são animadas de movimento de rotação inverso relativamente ao da cuba é de aconselhar.

Os inertes utilizados na confecção da argamassa ou do betão devem estar limpos e secos.

Para a confecção das argamassas, é aconselhável utilizar areias secas, de granulometria contínua, e condicionadas em embalagens estanques. Uma areia siliciosa,

de granulometria $0 - 1,2\,mm$, fornecida seca e em sacos de 50 kg, está bem adaptada à confecção das argamassas de epóxido. Areia calcária bem graduada pode também servir. As argamassas de epóxido com areia calcária têm coeficientes de dilatação linear que podem ser mais próximos dos da argamassa de cimento.

A aplicação das argamassas ou dos betões de epóxidos efectua-se por compressão ou por vibro-compressão. A vibração isolada é desaconselhável.

Os recipientes e as ferramentas destinados à preparação dos epóxidos, das argamassas ou dos betões ou à sua aplicação devem estar limpos e secos. A sua limpeza deve efectuar-se logo após a utilização com um solvente orgânico apropriado (tricloroetileno, metil-etil-cetona, xileno ou tolueno) ou ainda com água quente adicionada a um detergente ou sabão.

2.5.2.1.4 Segurança do pessoal

Os epóxidos podem ser irritantes ou causar alergias na pele de algumas pessoas, convém, pois, evitar todo o contacto do polímero ou dos seus constituintes com a pele, as mucosas e os olhos. A utilização de luvas e óculos de protecção é fundamentalmente recomendada (Fig. 2.15).

As aplicações em locais fechados exigem um arejamento suficiente para segurança do pessoal.

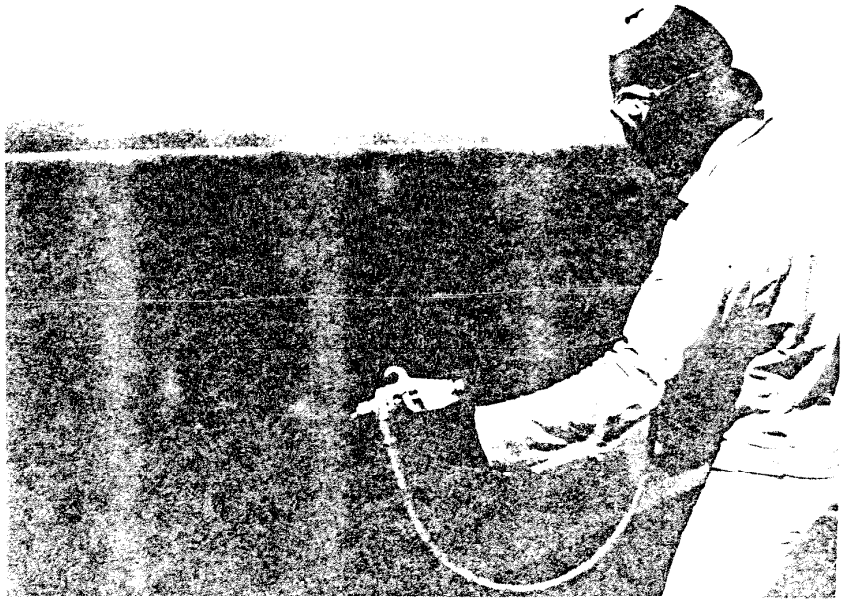


Fig. 2.15 - *Equipamento de protecção a utilizar na aplicação de um epóxido à pistola*

2.5.2.2 Revestimentos superficiais de espessura superior ou igual a 2 *cm*

No Quadro 2.2 mostram-se as características principais dos epóxidos utilizados em revestimentos superficiais de espessura superior ou igual a 20 *mm*.

As regras de utilização são análogas às definidas para os revestimentos de espessura inferior a 20 *mm*.

QUADRO 2.2

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS PRODUTOS		LIGANTES EPÓXIDOS	
		Ligantes puros ou carregados	Argamassas ou betões
ADERÊNCIA SOBRE SUPORTE	seco	Bom	Necessita de uma camada de aderência em ligante epóxido ou poliuretano
	húmido	Depende da formulação	Necessita de uma camada de aderência em ligante epóxido devidamente formulada
RETRACÇÃO		Fraca	Inferior à das argamassas e betões hidráulicos
COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA			Superior ao das argamassas e betões hidráulicos. Depende dos granulados e da % de resina.
TIXOTROPIA		Nula sem carga mineral	Depende da natureza e da % de cargas.
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS		Elevadas	Superior à das argamassas e betões hidráulicos. Depende da % de resinas.
MÓDULO DE ELASTICIDADE		1 a 3 GPa	10 a 30 GPa
FLUÊNCIA			Fluência diferida importante sob carga permanente. Emprego desaconselhado sob grande compressão.
DOMÍNIOS DE UTILIZAÇÃO		Camadas de aderência ao suporte betão	Utilização limitada devido aos preços elevados dos materiais. Reparação de betão destacado, tapar buracos e cavidades. Rebocos superficiais (atenção ao coeficiente de dilatação térmica). Revestimento anti-desgaste, impermeável, e protecção contra a corrosão.

2.6 Reparações internas

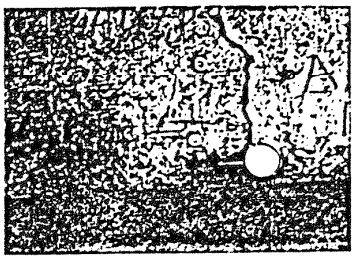
2.6.1 Produtos a utilizar

Nas páginas seguintes apresentam-se fichas que permitem a escolha dos produtos a utilizar em cada patologia relativa à fissuração do betão.

Uma vez mais os epóxidos são considerados os produtos mais eficazes.

PROBLEMA

Fissuras activas profundas[+]



REPARAÇÃO

Colmatagem por injecção

PRODUTOS UTILIZÁVEIS

Epóxido[++]

Poliuretano

Termoplástico[+++]

Epóxido

Poliuretano

Termoplástico

EXECUÇÃO

- Ligante epóxido não plastificado
- Ligante poliuretano elástico (aplicação resguardada de água)
- Ligante acrilamido
- Mastiques epóxidos elásticos, após impregnação com polímeros puros.
- Mastiques de poliuretano elásticos em meio seco.
- Mastiques de silicone sobre camada de aderência em epóxido.

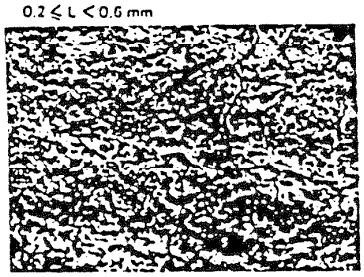
\+ Se as resistências estiverem em causa, o problema é mais complexo e não é do âmbito desta ficha.

++ O ligante não plastificado deve possuir uma extensão à rotura > 100% após endurecimento completo e deve ser elástico para acompanhar as deformações da fissura. Deve, também apresentar uma resistência à tracção superior à do betão (R_t > 4MPa).

+++ Só utilizar os acrilamidos para obturar fissuras em meios saturados (retracção muito importante em meio seco 30 a 40%). Os ligantes propostos não podem conter agentes agressivos para as armaduras.

PRODUTOS DESACONSELHÁVEIS

- Ligantes hidráulicos

PROBLEMA	PRODUTOS UTILIZÁVEIS	EXECUÇÃO
Fissuras passivas de abertura L ou cavidades internas+ L < 0.2 mm REPARAÇÃO Colmatagem por injecção	Poliester Epóxido Termoplástico++	- Poliesteres com baixa retracção ou epóxido muito fluido e sem diluentes (v< 0,1 Pas a 20 °C) - Ligante acrilamido
0.2 ≤ L < 0.6 mm  REPARAÇÃO Colmatagem por injecção	Epóxido Termoplástico++	- Ligantes epóxidos fluidos e sem diluentes (v< 0,5 Pas a 20 °C) - Ligante acrilamido
0.6 ≤ L < 3 mm REPARAÇÃO Colmatagem por injecção	Epóxido + Carga Termoplástico++	- Ligantes epóxidos puros ou com cargas sem diluentes (v< 1,5 Pas a 20 °C) - Ligantes acrilamidos

+ Efectuar carotagens para avaliar a quantidade de ligante a injectar e a sua natureza.

++ Certificar-se que os acrilamidos propostos não contêm agentes agressivos para as armaduras de betão armado ou de betão pré-esforçado. Utilizar apenas para obturar em meio saturado (retracção elevada em meio seco).

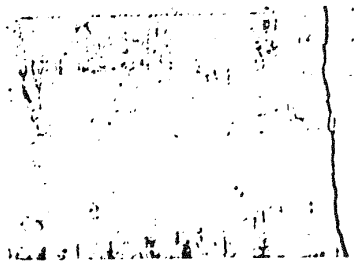
PRODUTOS DESACONSELHÁVEIS

Não se aconselha em qualquer dos casos a utilização de ligantes hidráulicos.

PROBLEMA

Fissuras passivas de abertura L ou cavidades internas

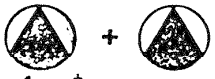
$L \geqslant 3\,mm$



REPARAÇÃO

Colmatagem por injecção

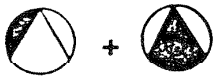
PRODUTOS UTILIZÁVEIS



Epóxido+ Carga

Cimento CPN

Cimento CE



Cimento CPN Epóxido

EXECUÇÃO

— Ligante epóxido puro ou com cargas sem diluentes.

— Ligação dos elementos da estrutura para transmissão dos esforços de compressão com uma calda de cimento portland normal.

— Calda de cimento com retracção compensada.

— Calda de cimento portland normal + epóxido.

+ Atenção à fluência dos polímeros termoendurecíveis.

PRODUTOS DESACONSELHÁVEIS

- Polímeros termoplásticos e CPN+polímeros termoplásticos.
- Poliesteres.

2.6.2 Condições de utilização

No Quadro 2.3 mostram-se as características principais dos epóxidos utilizados em injeccção de fissuras.

A mistura dos componentes do epóxido deve efectuar-se com cuidados análogos aos descritos no número 2.5.

A limpeza das fissuras é sempre difícil de efectuar. No entanto, temos a vantagem de as superfícies se apresentarem com uma rugosidade satisfatória, sendo necessário eliminar as poeiras, óleos e gorduras que eventualmente se tenham depositado. Em fissuras antigas surgem com frequência quantidades elevadas de calcite que convém eliminar. Esta e outras impurezas eventuais que prejudicarão forçosamente a aderência não são fáceis de eliminar.

O tratamento com ácido é desaconselhável para a limpeza das fissuras de betão armado ou pré-esforçado.

Na maior parte dos casos temos que nos contentar com um desempoeiramento com ar comprimido (Fig. 2.16). As fissuras poderão ainda ser lavadas com água, se houver a certeza de poder em seguida eliminar completamente a água introduzida, através de um jacto de ar comprimido.

QUADRO 2.3

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DOS PRODUTOS		LIGANTES EPÓXIDOS
RETRACÇÃO DE POLIMERIZAÇÃO		Fraca
ADERÊNCIA SOBRE SUPORTE	seco	Boa
	húmido	Depende da formulação
DURAÇÃO PRÁTICA DE UTILIZAÇÃO		Varia em função da temperatura ambiente e da massa de ligante
RESISTÊNCIAS MECÂNICAS		Boas mas diminuem à medida que a fluidez aumenta. Atenção às resistências mecânicas quando a viscosidade é inferior a $0,05\ ks/m^2$
FLUÊNCIA		
APLICAÇÕES POSSÍVEIS		Impermeabilização. Injecção de fissuras passivas. Injecção de fissuras activas com ligantes epóxidos não plastificados com extensão à rotura > 100% após endurecimento completo e uma resitência à tracção > 4 MPa

Após a limpeza deve dispôr-se um tubo injector em cada extremidade da fissura a reparar e colocar peças que servirão de aberturas ao longo da fissura, de maneira que o seu espaçamento não ultrapasse 30 a 40 *cm* (Fig. 2.17).

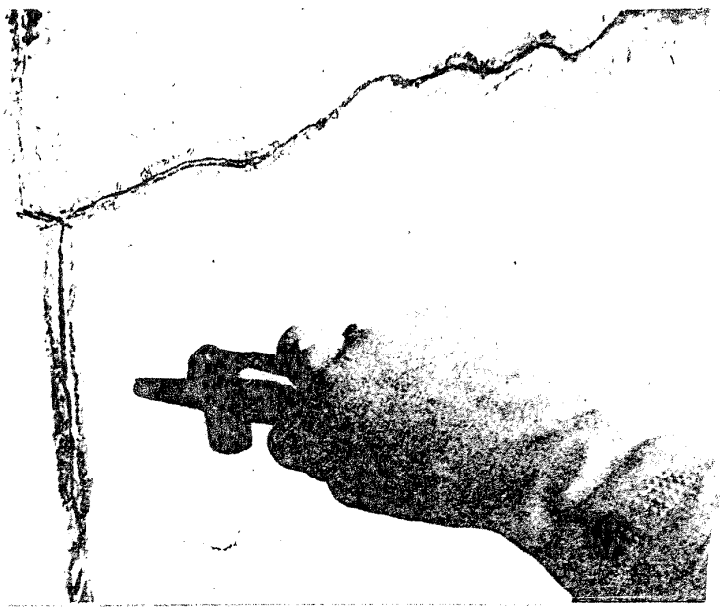


Fig. 2.16 - *Limpeza de uma fissura com jacto de ar comprimido*

Em seguida chumbam-se os tubos injectores e selam-se ao mesmo tempo os bordos da fissura utilizando um epóxido pastoso e de presa rápida (Fig. 2.17). Se a fissura atravessar a espessura da peça de betão, convém igualmente selá-la do lado oposto ao da injecção.

Depois do endurecimento do produto de selagem superficial, deve verificar-se, através da injecção de ar comprimido que a fissura não está obturada e que existe uma boa comunicação entre todas as aberturas.

Na medida do possível, devem injectar-se as fissuras no momento em que elas estão com a sua abertura máxima e num período em que a variação de temperatura seja reduzida.

Após se ter efectuado a mistura da base com o endurecedor, com precauções análogas às descritas no número 2.5, deve iniciar-se a injecção procedendo da forma seguinte:

- introduzir o epóxido pelo tubo injector colocado na extremidade mais baixa (Fig. 2.18);

- acompanhar a progressão do epóxido e fechar as saídas intermédias à medida que o ligante comece a sair por elas;
- prosseguir a injecção, sem interrupção, até que o epóxido saia pela abertura mais elevada;
- fechar esta última abertura e manter a pressão de injecção durante alguns minutos para se assegurar um completo enchimento da fissura.

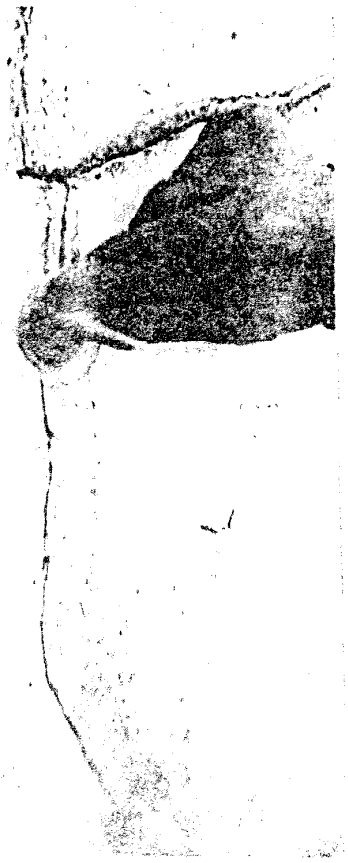


Fig. 2.17 - *Colocação de tubos injectores*

A pressão de injecção poderá variar segundo a técnica utilizada e o estado do betão. Em todo o caso, é aconselhável trabalhar a uma pressão tão baixa quanto possível, para permitir a difusão do epóxido nas ramificações mais finas da fissura e nas porosidades do betão. A pressão de injecção não deve ser nunca superior a $0,5\ MPa$.

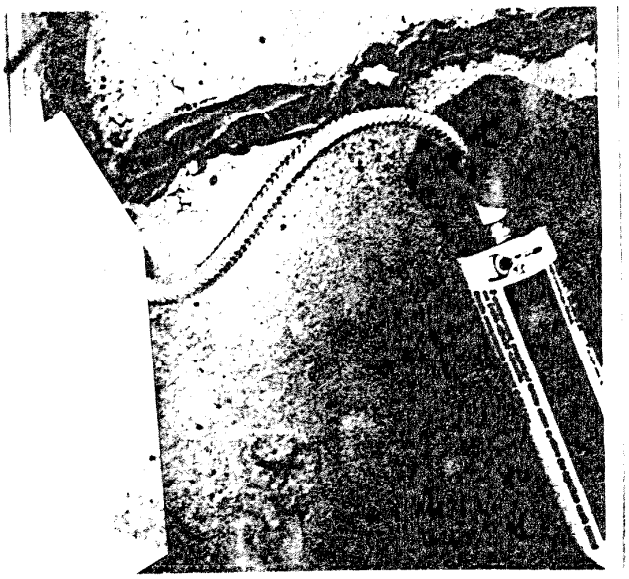


Fig. 2.18 - *Ligação do cartucho ao tubo injector*

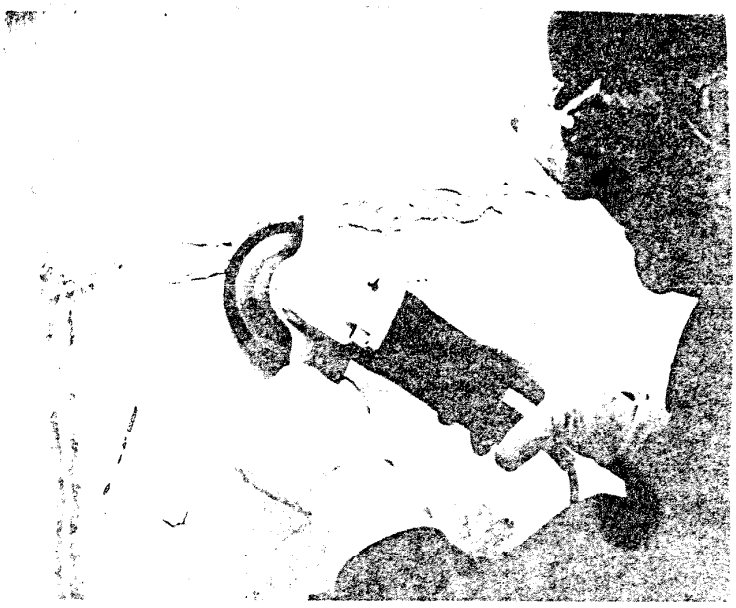


Fig. 2.19 - *Remoção do epóxido selante com rebarbadora*

A injecção deve efectuar-se com uma pistola de ar comprimido ou de preferência com um aparelho de injecção munido de um manómetro de tal forma que se possa controlar a pressão de injecção.

As ligações com os tubos injectores deverão ser maleáveis e translúcidas. Podem ser de material polimérico, eventualmente armado para resistir às sobrepressões eventuais e à acção química dos epóxidos.

Os tubos injectores e as aberturas deverão ser metálicos. Utilizam-se de preferência injectores lisos que se dispõem sobre os bordos da fissura a reparar. Os injectores são munidos de um ajuste perpendicular à superfície do betão para permitir a introdução do produto de injecção.

Geralmente 7 horas após a injecção os epóxidos apresentam já um endurecimento satisfatório o que possibilita a remoção dos tubos injectores, das aberturas e do epóxido selante (Fig. 2.19).

2.7 Colagens

Para além do que já foi referido no número 2.5 no que diz respeito à preparação das superfícies, mistura dos constituintes e aplicação do epóxido que serve na totalidade para as colagens betão endurecido / betão endurecido e betão endurecido / betão novo há certos cuidados próprios destas aplicações que referiremos agora.

Se for de prever a ocorrência de movimentos em elementos colocados em certas posições, tais como elementos inclinados ou verticais, deve, temporariamente, escorar-se e fixar-se esses elementos.

Se o epóxido endurecer antes dos elementos a ligar estarem em contacto, deve remover-se ou raspar-se levemente a primeira camada antes da colocação de uma segunda camada.

Não se deve causar qualquer perturbação aos elementos que foram colados até que o epóxido tenha atingido a resistência suficiente.

Em relação às colagens betão fresco / betão endurecido, deve atender-se a que o betão fresco deve ser colocado enquanto a cola estiver viscosa. Como é evidente deve utilizar-se um epóxido capaz de endurecer na presença de água.

O betão fresco deve ser colocado de forma a assegurar a ligação total dos seus constituintes e a evitar a possibilidade de segregação.

2.8 Controlo de qualidade

O controlo de qualidade dos produtos utilizados nas reparações e colagens de betão, bem como dos processos de aplicação é de extrema importância. Em relação

ao tipo de ensaios a efectuar podemos encontrar em [27,28,29] indicações importantes.

Os ensaios mais importantes podem agrupar-se da seguinte forma:

— ensaios de aderência, incluem-se neste grupo os ensaios de arrancamento, corte oblíquo, corte directo, tracção directa e flexão quatro pontos;

— ensaios de envelhecimento, incluem-se neste grupo os ensaios de solicitação dinâmica e de compatibilidade térmica;

— ensaio de injectabilidade, destina-se a caracterizar a facilidade com que um epóxido penetrará nas fissuras.

O ensaio de arrancamento destina-se a determinar em laboratório a resistência à tracção das camadas de pintura ou de revestimento de espessura t_0 aplicadas sobre uma superfície em betão húmida ou seca, por comparação com um valor de referência (Fig. 2.20).

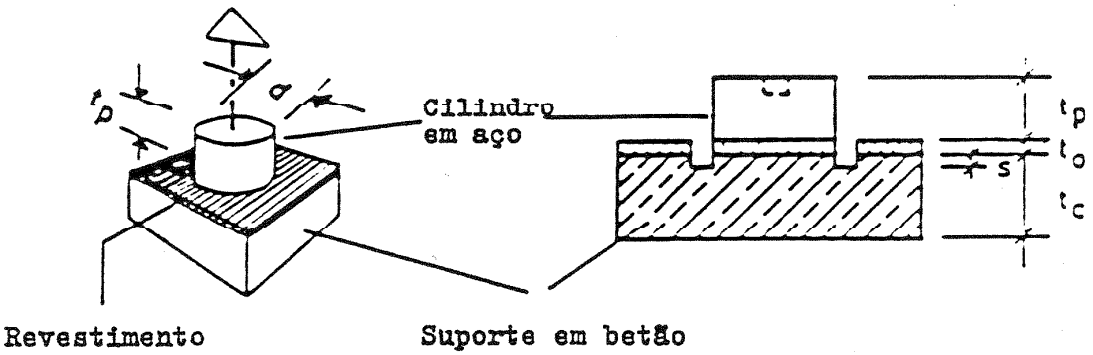


Fig. 2.20 - *Esquema do ensaio*

A aderência determina-se levando à rotura, por tracção em máquina apropriada, uma secção cilíndrica do revestimento da superfície (Fig. 2.20). A secção cilíndrica sobre a qual vai incidir o ensaio é, previamente, desligada do restante revestimento, utilizando-se para o efeito uma caroteadora de pequeno porte.

O ensaio de corte oblíquo utiliza prismas reconstituídos com um plano de colagem que faz um ângulo de 30° com a vertical (Fig. 2.21). Após um período de conservação apropriado, o ensaio efectua-se através da aplicação de um esforço de compressão sobre o prisma reconstituído. Este ensaio aplica-se às colagens betão endurecido / betão endurecido, betão fresco / betão endurecido e argamassa de reparação / betão endurecido com ou sem camada de aderência.

O ensaio de corte directo utiliza provetes com a configuração representada na figura 2.22. A resistência das colagens ao corte é avaliada através da tensão de corte necessária para levar à rotura os prismas ligados por colagem.

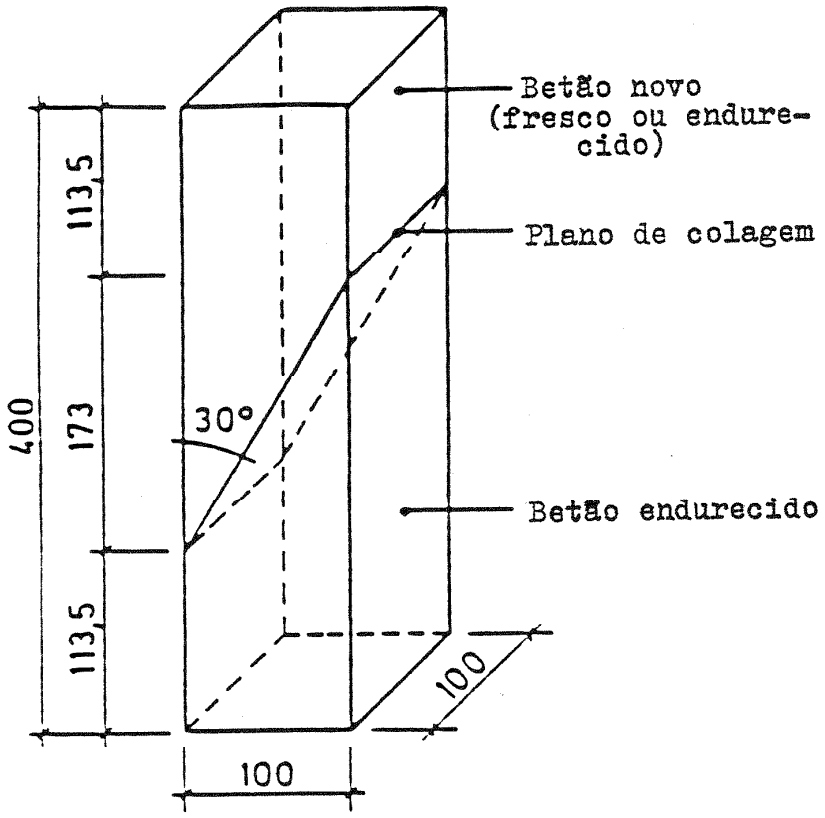


Fig. 2.21 - *Forma dos provetes*

O ensaio de tracção directa efectua-se sobre cilindros reconstituídos por colagem (Fig. 2.23). Este ensaio pode também efectuar-se sobre carotes obtidos in situ.

O princípio do ensaio de flexão quatro pontos consiste na aplicação de um produto de reparação para o preenchimento de uma fenda produzida sobre uma das faces de um provete prismático em betão e em submeter o provete assim obtido a um ensaio de flexão quatro pontos sob momento constante, a reconstituição é posicionada em fibra traccionada (Fig. 2.24).

O ensaio de solicitação dinâmica destina-se à determinação da resistência da aderência das argamassas de resina conservadas sob solicitação dinâmica. As condições de ensaio simulam a situação destas argamassas quando da sua utilização para reparação de pontes em serviço sob cargas de circulação.

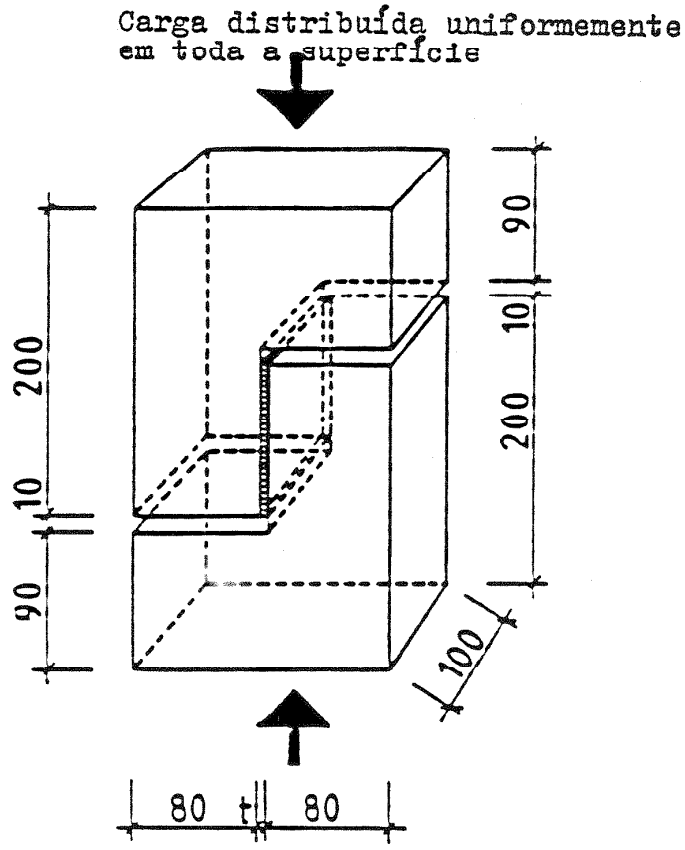


Fig. 2.22 - *Configuração do ensaio de corte directo*

Na figura 2.25 apresenta-se a geometria do provete utilizado. O ensaio efectua-se a uma temperatura de $20 \pm 5°C$ e uma humidade relativa de $65 \pm 5\%$. É considerada uma fase em que a ponte tem uma circulação reduzida. Assim, durante 24 h o provete é submetido a ciclos de carga - descarga com uma frequência de $4,2\ HZ$ e com carga máxima igual a $8,0\ KN$. Em seguida a carga máxima passa a $40,0\ KN$ e com a mesma frequência efectuam-se 2×10^6 ciclos. Quando estes ensaios terminarem efectuam-se ensaios de arrancamento num mínimo de cinco zonas.

Os ensaios de compatibilidade térmica destinam-se a determinar o comportamento térmico dos produtos de reparação. Há três ensaios que se devem efectuar: gelo-degelo, choque térmico e variações cíclicas de temperatura.

O ensaio de gelo-degelo consiste em mergulhar sucessivamente os provetes em água salgada a $-18 \pm 2°C$. Os provetes ficam uma hora em cada banho (Fig. 2.26). O banho começa com imersão em água à temperatura normal. O conjunto de ciclos dura 200 horas (100 ciclos). A temperatura de $20 \pm 2°C$ mede-se numa zona próxima do provete. Os provetes colocam-se sempre em posição vertical (Fig. 2.27).

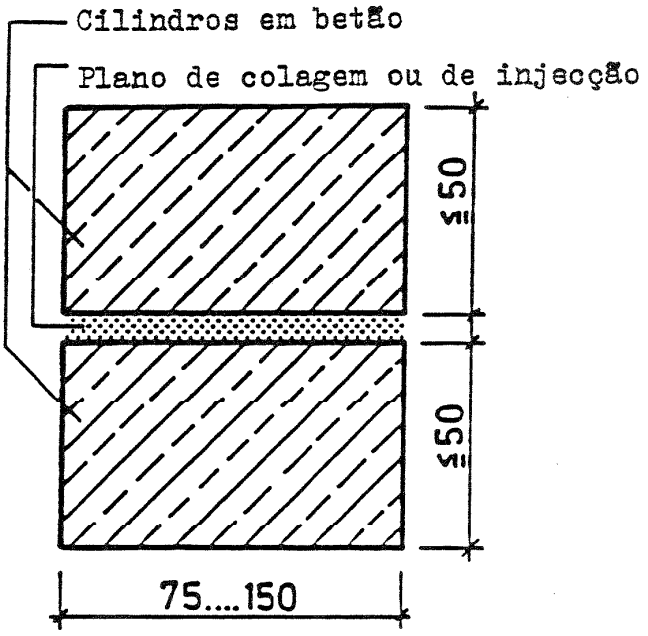


Fig. 2.23 - *Dimensões (mm) do provete cilíndrico*

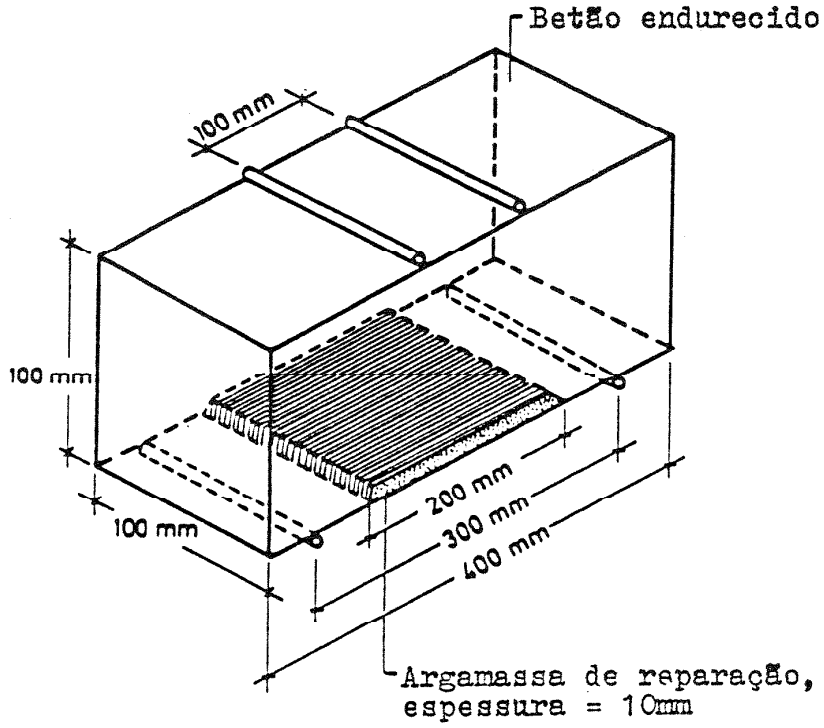


Fig. 2.24 - *Provete reconstituído*

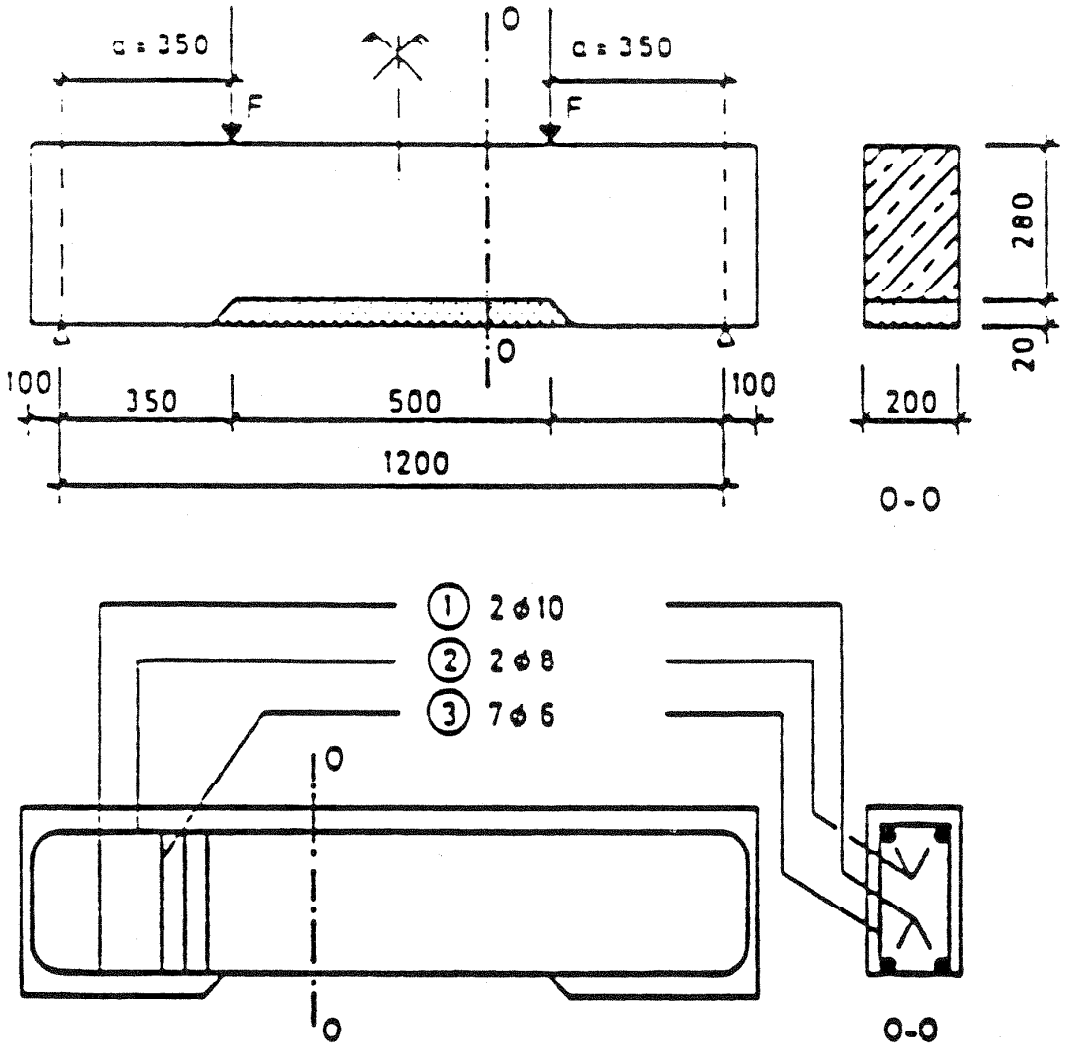


Fig. 2.25 - *Forma e constituição da armadura da viga em betão armado*

Os ensaios de choque térmico compreendem uma fase de aquecimento a $60 \pm 2°C$ durante 6 horas, com humidade relativa igual a $90 \pm 2\%$ e uma fase de chuva artificial de 10 minutos (caudal de 30 a 40 ℓ/min) com água à temperatura de $10 \pm 2°C$. O ensaio de choque térmico completo compreende 50 ciclos (Fig. 2.28). No decurso da fase de aquecimento, a temperatura da superfície do provete deve atingir $60 \pm 2°C$ o mais rapidamente possível, o ar quente deve ser impulsionado mecanicamente.

No decurso da projecção de chuva artificial, o provete será colocado em posição horizontal sobre uma grade metálica (Fig. 2.29). O tubo de projecção de água estará fixado 30 a 50 cm acima da superfície em estudo.

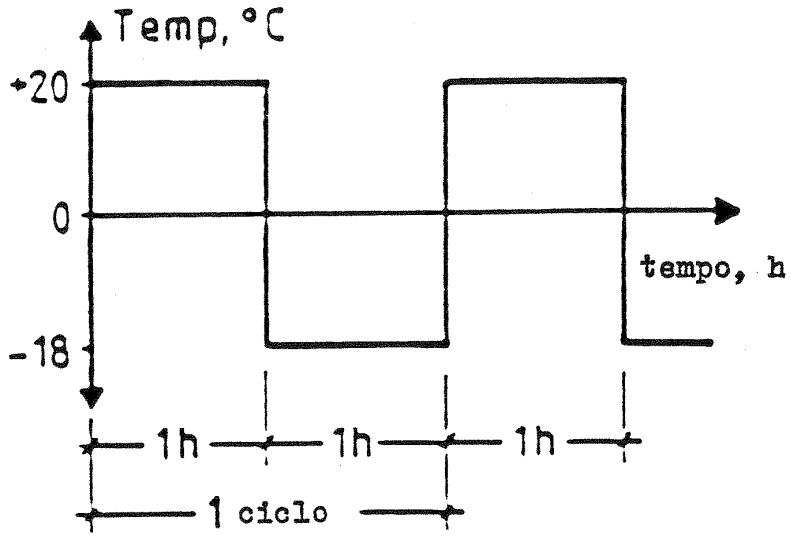


Fig. 2.26 - *Ciclos de gelo-degelo*

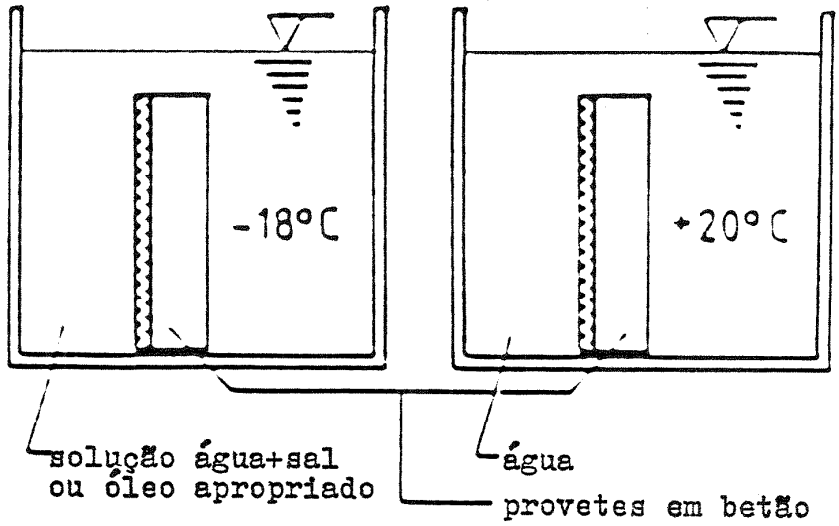


Fig. 2.27 - *Posicionamento dos provetes*

Os ensaios de variações cíclicas de temperatura ambiente efectuam-se com 100 ciclos em que a temperatura varia de -25 a $+55°C$ (Fig. 2.30).

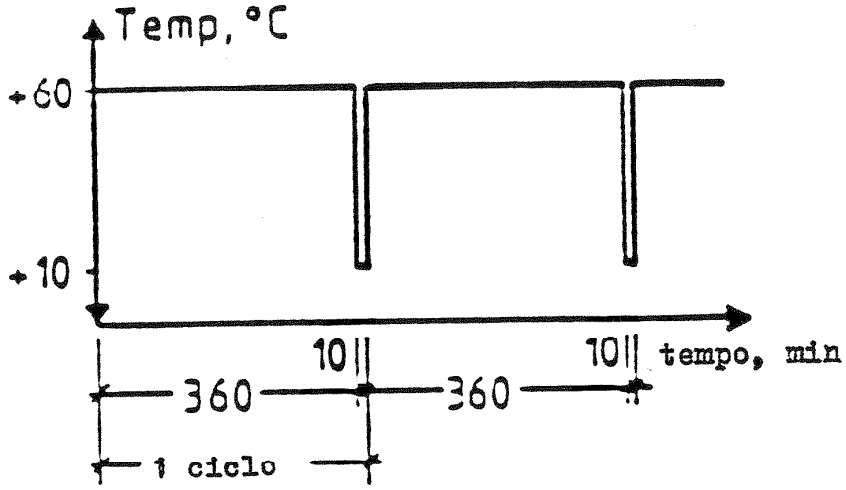


Fig. 2.28 - *Ciclos de choque térmico*

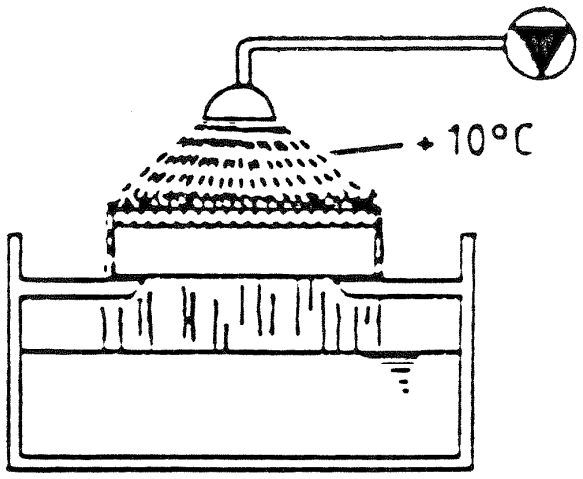


Fig. 2.29 - *Posicionamento dos provetes*

Após cada ensaio de compatibilidade térmica a aderência é avaliada através de ensaios de arrancamento em pelo menos 5 zonas de cada provete.

Finalmente o ensaio de injectabilidade tem como objectivo determinar a facilidade de injecção de um produto numa rede capilar e a sua aderência ao betão através da avaliação da resistência à tracção de provetes cilíndricos de argamassa provenientes da injecção de uma coluna de areia.

O aparelho utilizado descreve-se na figura 2.31. O princípio do ensaio consiste em injectar, sob pressão constante, o produto a ensaiar numa coluna em plástico transparente cheia de areia calibrada e mantida na vertical.

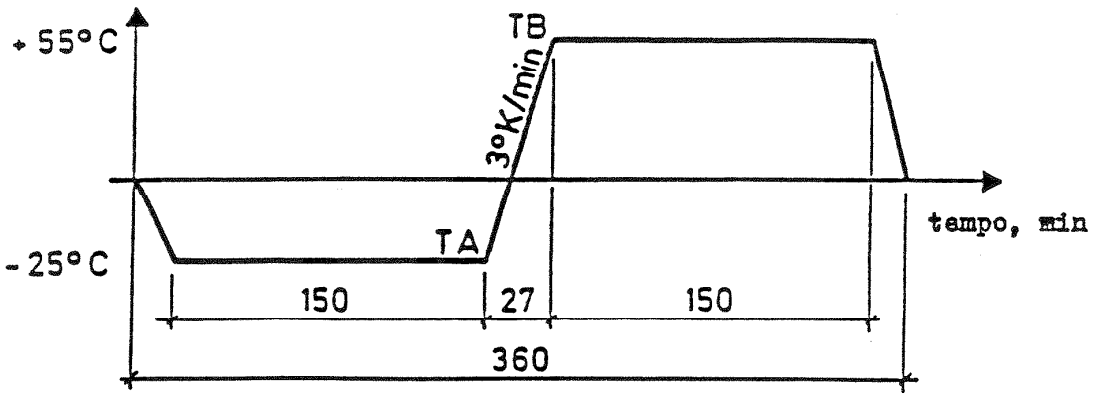


Fig. 2.30 - *Ciclo térmico*

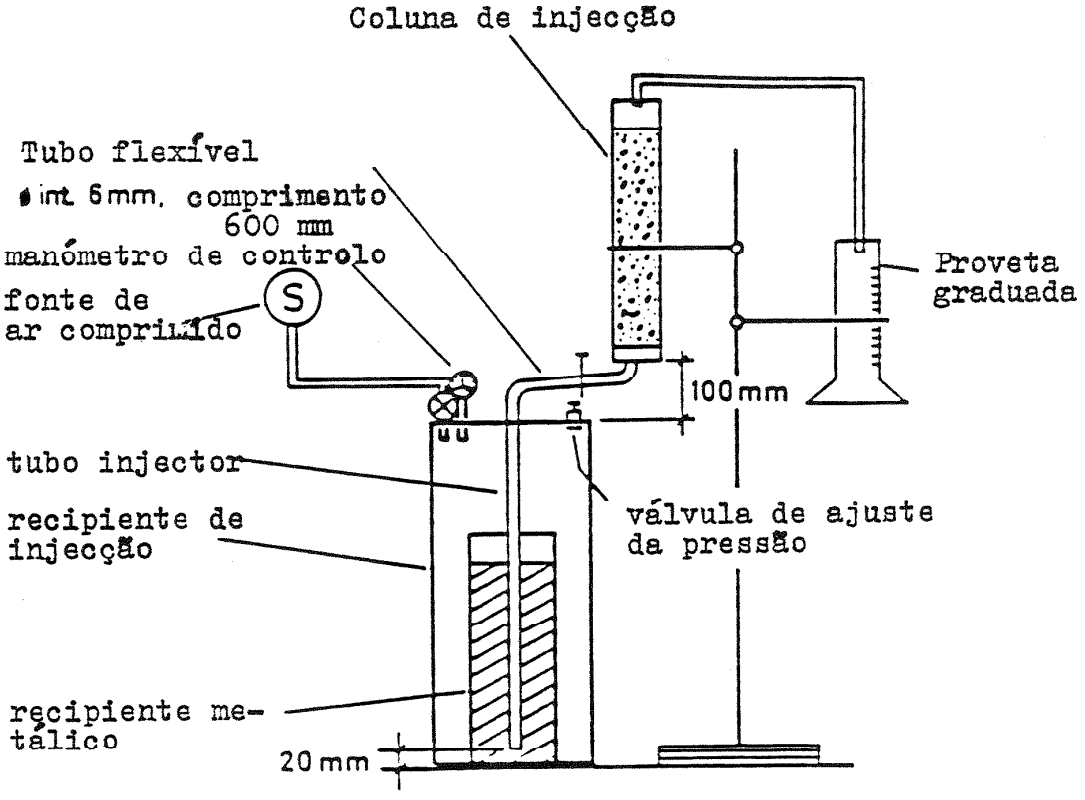


Fig. 2.31 - *Esquema do aparelho*

A injecção faz-se a partir da extremidade inferior da coluna. Mede-se os intervalos de tempo que o produto necessita para atingir diferentes marcas de referência colocadas ao longo da coluna.

A determinação da resistência à tracção efectua-se 28 dias após a injecção através de um ensaio brasileiro. Os provetes cilíndricos utilizados obtêm-se por serragem da coluna.

Capítulo 3

Elementos de mecânica da fractura

3.1 Introdução

Neste capítulo abordaremos uma nova matéria no domínio da engenharia designada por mecânica da fractura. Esta disciplina foi iniciada por Griffith [31] em 1920 com a finalidade de explicar a diferença existente entre as resistências mecânicas determinadas analiticamente e as que se verificam experimentalmente. No entanto, já em 1913, Inglis [32] tinha colocado em evidência o crescimento rápido das tensões na frente de fissura. As conclusões a que chegaram estes dois investigadores serão desenvolvidas adiante.

A mecânica da fractura tem-se revelado muito importante na interpretação dos ensaios de resistência mecânica da generalidade dos materiais. A determinação de propriedades como a tenacidade e a energia de fissuração que definiremos adiante, permite-nos um conhecimento mais aprofundado dos materiais ou das ligações entre materiais diferentes.

3.2 Modos de rotura

A rotura caracteriza-se, localmente, pela separação irreversível de um meio contínuo em duas partes de um lado e de outro de uma superfície geométrica (Fig. 3.1), originando o que se costuma designar por fissura.

Após a rotura, os pontos materiais situados sobre as faces S^+ e S^- da fissura sofrem um deslocamento $[u_i]$, dado por:

$$[u_i] = u_i^+ - u_i^-$$

A componente normal $[u_n]$ do deslocamento é designada por abertura da fissura.

Esta componente é sempre não negativa porque as faces S^+ e S^- só podem afastar-se uma da outra. Por outro lado, a componente tangencial do deslocamento, que é o deslizamento relativo das duas faces da fissura pode tomar qualquer sinal [32].

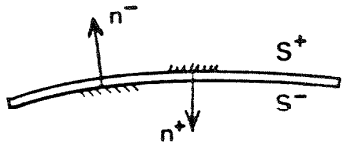


Fig. 3.1 - *Fissura em corte*

Logo que a separação do meio contínuo é efectiva, as tensões sobre as superfícies S^+ e S^- anulam-se:

$$T_i = \sigma_{ij} n_j = 0 \tag{3.1}$$

onde, σ_{ij} é o tensor das tensões e n_j a normal exterior a cada uma das faces da fissura.

As fissuras nos sólidos podem considerar-se como descontinuidades do campo de deslocamentos. Os movimentos das faces das fissuras são o resultado da combinação de três modos de rotura (Fig. 3.2). As setas indicam os deslocamentos relativos das duas faces.

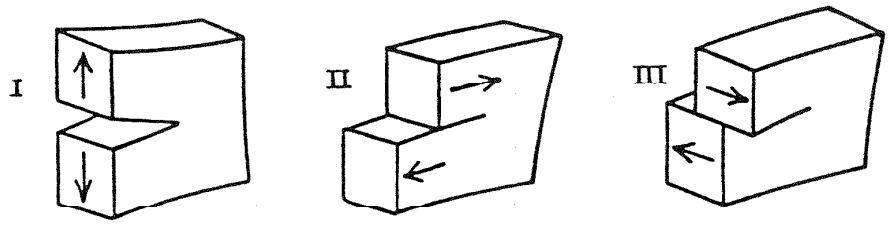


Fig. 3.2 -*Modos de rotura*

O modo I é designado por abertura, os modos II e III são designados por deslizamentos. O modo I é o mais importante para o estudo da maioria dos materiais, em mecânica da fractura.

A separação nestes modos diz respeito a fissuras caracterizadas por uma curva resultante da intersecção das duas superfícies de rotura, designada por frente de fissura (Fig. 3.3).

A definição de cada um deste modos é a seguinte [33]:

- Modo I — *as superfícies da fissura deslocam-se perpendicularmente em relação à frente de fissura e em planos diferentes;*
- Modo II — *as superfícies da fissura deslocam-se no mesmo plano e numa direcção perpendicular à frente de fissura;*
- Modo III — *as superfícies da fissura deslocam-se no mesmo plano e numa direcção paralela à frente de fissura.*

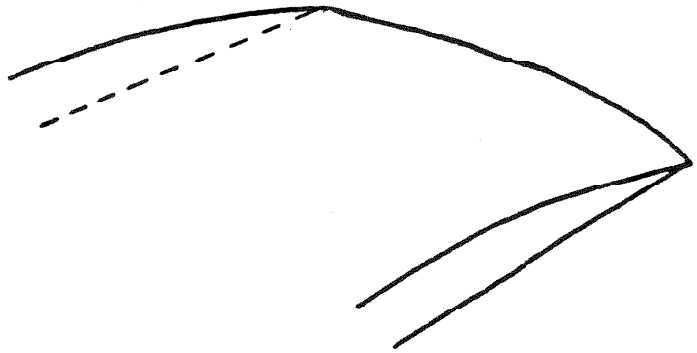


Fig. 3.3 - *Frente de fissura*

Quando vários modos estão presentes diz-se que se trata de um modo misto. No entanto, é comum abordar um problema de propagação de uma fissura separando cada um dos três modos.

Quando se aplicam cargas a um sólido fissurado podem distinguir-se, geralmente, duas fases [32]:

1. Fissura imóvel — *a fissura abre-se sem alteração da forma da sua superfície S;*
2. Fissura em propagação — *a fissura avança, quer seja no plano tangente a S ou noutras direcções.*

A propagação de uma fissura necessita que seja aplicada uma carga ou uma deformação ao sistema, de tal forma que ele armazene energia elástica. Quando a fissura se propaga, parte dessa energia elástica é utilizada no processo de separação do meio contínuo. Na hipótese de Griffith [30], esta energia é proporcional à área de fissura criada:

$$dw_s = 2\gamma ds$$

γ é a energia superficial característica do material, ds é a área da nova fissura, a área total é a das duas faces ou seja o dobro.

O fenómeno da separação é de natureza essencialmente irreversível. As novas superfícies criadas podem retomar contacto, mas não se ligam nunca. A energia superficial, γ, é a energia necessária para criar de forma irreversível e isotérmica uma unidade de superfície nova do sólido. Esta energia está directamente ligada à natureza das ligações que asseguram a coesão do material (Van der Waals, iónica, metálica, covalente, etc.) e depende das condições ambiente [34]. A energia superficial raramente excede $2N/m$ [35].

Continuando a propagação da fissura o sólido é levado à rotura. Segundo a resposta mecânica do material podemos distinguir dois tipos de rotura [36]:

- uma rotura frágil quando não existe deformação plástica apreciável na fase de propagação. Esta rotura produz-se através do afastamento normal das faces da fissura e é perpendicular à direcção da tensão de tracção mais elevada;
- uma rotura dúctil quando há deformações plásticas importantes. Esta rotura dá-se com deslizamento e é, em geral, oblíqua em relação à direcção da tracção mais elevada.

Quando se observa a resposta do material às solicitações exteriores, por exemplo a cargas crescentes, Q_i (forças generalizadas), às quais correspondem deslocamentos generalizados, q_i, o ponto de rotura R encontra-se na parte elástica da resposta, para a rotura frágil ou na parte plástica para a rotura dúctil (Fig. 3.4).

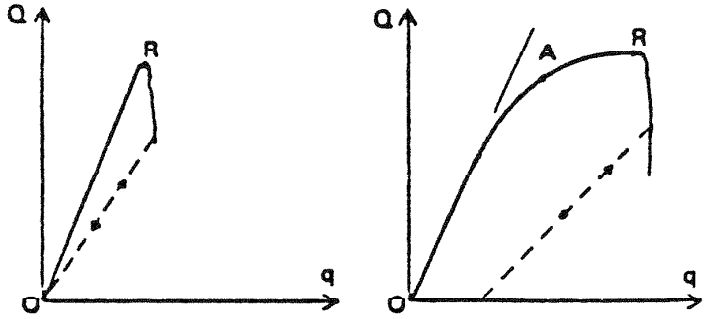


Fig. 3.4 - *Curvas carga-deformação características da rotura frágil (a) e da rotura dúctil (b)*

O estudo da rotura frágil no caso dos materiais elásticos lineares constitui o que se designa por mecânica da fractura linear. A terminologia utilizada não é muito correcta na medida em que, o processo de separação é de natureza, essencialmente não linear. Na realidade, a linearidade só se verifica até ao ponto de rotura, R, enquanto a fissura não evolui (Fig. 3.4). Isto quer dizer que não há alteração da geometria do meio contínuo. Uma nova fissura dS equivale, do ponto

de vista mecânico, a uma alteração das condições limites existentes sobre as duas superfícies criadas dS^+ e dS^-. As tensões presentes antes da separação anulam-se completamente depois. Devido ao facto de a separação ter lugar, praticamente sem plasticidade, considera-se que o meio contínuo continua com um comportamento elástico. Por este motivo a mecânica da fractura frágil pode estudar-se no âmbito da teoria da elasticidade clássica.

O estudo das condições de rotura dúctil é mais delicado porque para além dos fenómenos de separação ainda mal conhecidos, há o comportamento do meio contínuo que não está, ainda, bem modelizado. Na curva de resposta $Q(q)$ (Fig. 3.4) de uma peça fissurada submetida a uma acção qualquer, podem distinguir-se dois pontos importantes:

- Ponto de arranque A. É o ponto a partir do qual a fissura cresce de forma estável, no sentido de que para que ela avance é necessário aumentar a carga. Designa-se por propagação estável ou subcrítica;
- Ponto de rotura R. A fissura cresce de forma instável. Diz-se que a rotura é catastrófica.

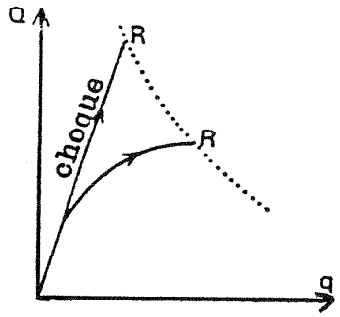


Fig. 3.5 - *Curvas carga-deformação de um material viscoelástico*

Os dois pontos A e R, nitidamente separados no caso dúctil, confundem-se no caso frágil. Por outro lado, neste caso, não há deformação plástica considerável, mesmo sobre a parte da curva descendente após rotura. Com efeito, se em qualquer ponto da curva descendente imaginarmos uma descarga elástica virtual, seguiremos uma recta de inclinação inferior à recta inicial, uma vez que a fissura aumentou. Esta recta de retorno dirige-se praticamente para a origem. No caso dúctil, ela não se dirige para a origem, mas para um outro ponto, o que indica uma deformação permanente.

Note-se que a ductilidade pode depender da velocidade de deformação, é o caso dos materiais viscoelásticos. Durante uma aplicação de carga muito rápida, caso de choques, por exemplo, o material pode responder de forma quase elástica. Sob acção de uma carga quase estática o mesmo material pode romper-se de forma dúctil (Fig. 3.5).

3.3 Mecânica da fractura linear

3.3.1 Concentração de tensões

Inglis [31] em 1913, conseguiu pôr em evidência a concentração de tensões na proximidade da fissura. Para isso, Inglis considerou uma placa de dimensões infinitas, contendo uma fissura que ele assemelhou a uma elipse muito achatada e estudou em teoria da elasticidade este sistema. A placa é solicitada por uma tensão uniforme $\sigma_y = \sigma$ no infinito, de cada lado do eixo dos xx e o orifício elíptico tem o eixo maior $2a$, normal a $0y$ e o eixo menor $2b$ paralelo a $0y$ (Fig. 3.6).

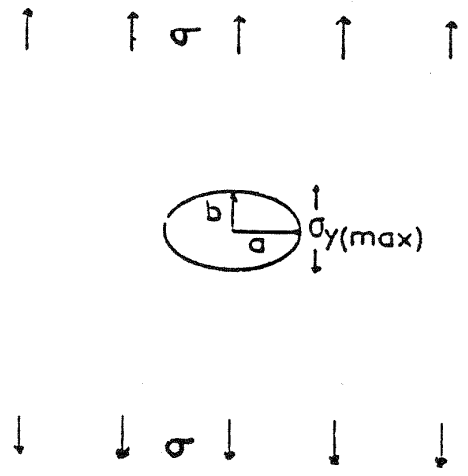


Fig. 3.6 - *Placa de dimensões infinitas com fissura elíptica, submetida à tracção.*

Inglis [31] encontrou uma concentração de tensões na proximidade das extremidades do eixo maior. A tensão máxima nestes pontos vale:

$$\sigma_y(max) = (1 + 2a/b)\sigma = k\sigma$$

k é designado por factor de concentração de tensão

Para certas formas de fissuras, correspondendo a elípses muito achatadas ($\frac{a}{b} \gg 1$), k pode tornar-se muito grande o que permite a obtenção de tensões locais muito elevadas, com um sistema de forças muito reduzidas.

Se é verdade que se pode utilizar esta teoria para explicar a propagação das fissuras e a rotura do material, não se pode esquecer as suas limitações. A primeira resulta da consideração de uma fissura como uma elipse. Por outro lado, sob o efeito das solicitações, o raio de curvatura da elipse nas extremidades do seu grande eixo, $\rho = \frac{b^2}{a}$, passa de um estado inicial $\rho = 0$ a um estado final $\rho = 4a\frac{\sigma^2}{E^2}$ em estado plano de tensão e $\rho = 4a(1-\nu^2)^2\sigma^2/E^2$ em estado plano de deformação, onde E representa o módulo de Young do material da placa e ν o seu coeficiente de Poisson. Esta modificação do raio de curvatura (Fig. 3.7) pressupõe deformações muito elevadas que não são possíveis em elasticidade [37].

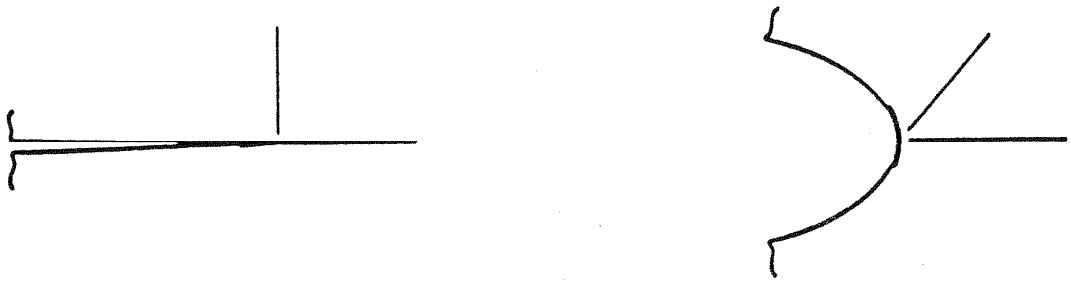


Fig. 3.7 - *Deformada da frente de fissura*

Estas considerações conduziram a que se efectuassem cálculos energéticos que consideram outras energias para além das potenciais de deformação.

Além do método atrás descrito existem outros que permitem avaliar as tensões e as deformações na proximidade da extremidade de uma fissura.

3.3.2 Método de Westergaard

Considerando a fissura como um segmento de recta, o raio de curvatura fica nulo (porque $b = 0$) e obteremos, através do cálculo elástico linear, tensões infinitas na proximidade da fissura.

Partindo deste raciocínio, Westergaard [38] estudou no âmbito da elasticidade linear (na ausência de forças volúmicas), o caso de elementos planos infinitos com fissuras assemelháveis a um segmento de recta do eixo Ox. Recorrendo a uma função de tensão bi-harmónica, ϕ, determinou as tensões na vizinhança da frente

de fissura:

$$\phi = R_e(Z) + yI_m(Z')$$

onde Z é uma função analítica da variável complexa $z = x + iy$ no plano complexo, excepto no segmento considerado, $Z'(z)$ a sua primeira derivada, $R_e(z)$ e $I_m(z)$ as suas partes real e imaginária, respectivamente. Para um segmento de recta $[-a, a]$, Z é da forma seguinte:

$$Z(z) = \frac{g(z)}{[(z+a)(z-a)]^{\frac{1}{2}}}$$

com $g(z)$ analítica em C.

Substituindo pela variável $\xi = z - a$ e considerando, apenas, o primeiro termo do desenvolvimento de Taylor de Z, obtem-se:

$$Z|\xi| \longrightarrow 0 \simeq k/(2\pi\xi)^{1/2}$$

O parâmetro k designa-se por factor de concentração de tensão. O conhecimento de Z conduz ao dos deslocamentos e das tensões. Estas possuem uma singularidade em $\xi^{-\frac{1}{2}}$ quando $|\xi|$ tende para zero.

3.3.3 Método de Muskhélichvili

Retomando o método precedente Muskhélichvili [39] trata uma gama mais extensa de problemas, exprimindo a solução geral sob a forma:

$$\phi = R_e[\overline{z}\psi(z) + \phi(z)]$$

onde ψ e ϕ são funções analíticas da variável complexa z.

Definindo, na extremidade Z_0 de uma fissura sobre o eixo real, um factor de concentração de tensão complexa dado por $k = k_I - ik_{II}$ (o índice corresponde ao modo de rotura escolhido) Muskhélichvili [39] é conduzido à seguinte expressão para k:

$$k = 2.(2\pi)^{1/2} \lim_{z \to z_0} (z - z_0)^{1/2}.\psi'(z)$$

Esta função ψ foi determinada para um grande número de casos de fissuras, porque permite a transformação conforme de orifícios em fissuras [40].

3.3.4 Factor de intensidade de tensão

Um tratamento mais sistemático e generalizado do problema é dado em [33]. Assim, consideremos uma fissura num sólido elástico e tomemos o sistema de eixos

cartesiano, em que Ox é o prolongamento da fissura, Oz é tangente à frente de fissura e Oy é perpendicular ao plano da fissura (Fig. 3.8).

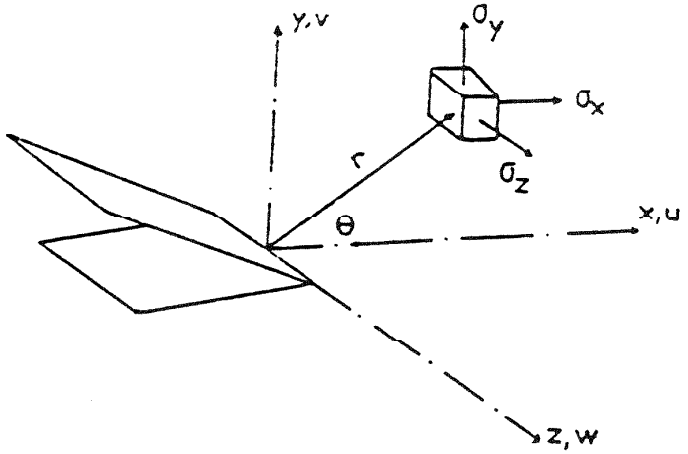


Fig. 3.8 - *Sistema de eixos cartesiano na frente de fissura*

Num plano normal à frente de fissura, um ponto M do sólido é representado pelas suas coordenadas polares r e θ. Se se procura a forma assimptótica do campo de deslocamentos na proximidade de $r = 0$ sob a forma:

$$u_i = r^{\alpha} g_i(\theta)$$

apercebemo-nos que em elasticidade linear, o sistema de equações da elasticidade, sem força volúmica e sob condições homogéneas (eq. 3.1) sobre a fissura e tensões nulas no infinito, admite uma solução não trivial para $\alpha = \frac{1}{2}$ [32]. Resulta, assim, que as tensões tendem para o infinito como $r^{-\frac{1}{2}}$ quando nos aproximamos da frente de fissura (Quadro 3.1).

Resumindo, temos:

$$\sigma_{ij} = k_L/\sqrt{2\pi r}\, f_{ij}^{(L)}(\theta)$$

Os coeficientes k_L, designados por factores de intensidade de tensão, são independentes de r e θ, controlam a intensidade do campo de tensão para cada modo de rotura mas não a distribuição destas tensões. Estes factores dependem apenas da distribuição das cargas exteriores num dado sólido e da geometria da fissura. Os valores destes coeficientes, determinados para numerosos problemas típicos de elementos de estruturas, foram reunidos por Hofer [41] e Tada [42] em formulários elementares.

Irwin resume a teoria baseada nos factores de intensidade de tensão na seguinte imagem [43,44]: dois sólidos com fissuras de comprimentos diferentes e com diferentes tipos de solicitação, são idênticos na proximidade da frente de fissura se os seus factores de intensidade de tensão são iguais. Tudo se passa como se um observador

QUADRO 3.1

Modo I

$$u \approx \frac{k_I}{2G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \cos\frac{\theta}{2}[k - \cos\theta]$$
$$v \approx \frac{k_I}{2G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \sin\frac{\theta}{2}[k - \cos\theta]$$
$$\sigma_x \approx \frac{k_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}[1 - \sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}]$$
$$\sigma_y \approx \frac{k_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}[1 + \sin\frac{\theta}{2}.\sin\frac{3\theta}{2}]$$
$$\tau_{xy} \approx \frac{k_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}.\sin\frac{\theta}{2}.\cos\frac{3\theta}{2}$$

Modo II

$$u \approx \frac{k_{II}}{2G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \sin\frac{\theta}{2}[2 + k + \cos\theta]$$
$$v \approx \frac{k_{II}}{G}\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2} \cos\frac{\theta}{2}[2 - k - \cos\theta]$$
$$\sigma_x \approx -\frac{k_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin\frac{\theta}{2}[2 + \cos\frac{\theta}{2}.\cos\frac{3\theta}{2}]$$
$$\sigma_y \approx \frac{k_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin\frac{\theta}{2}.\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}$$
$$\tau_{xy} \approx \frac{k_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}[1 - \sin\frac{\theta}{2}.\sin\frac{3\theta}{2}]$$

Modo III

$$w \approx 2\frac{k_{III}}{G}.\left(\frac{r}{2\pi}\right)^{1/2}.\sin\frac{\theta}{2}$$
$$\tau_{xz} \approx -\frac{k_{III}}{(2\pi r)^{1/2}}.\sin\frac{\theta}{2}$$
$$\tau_{yz} \approx \frac{k_{III}}{(2\pi r)^{1/2}}.\cos\frac{\theta}{2}$$

onde:

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$: módulo de corte

r, θ : coordenadas polares

$k = 3 - 4\nu$: em estado plano de deformação

$k = \frac{3-\nu}{1+\nu}$: em estado plano de tensão

K_I, k_{II}, k_{III} : parâmetros que dependem da solicitação, da geometria, da fissura e da forma do provete, são designados por factores de intensidade de tensão

microscópico olhando à volta da zona da frente de fissura não fosse capaz de saber se o aumento das tensões se deve ao aumento das cargas ou à propagação da fissura.

3.3.5 Tenacidade à fractura

Em mecânica da fractura linear e em modo de abertura, a maior parte das teorias conduzem à noção de um valor crítico, não para a tensão que é infinita na frente de fissura, mas para o factor k_I. Assim, temos um critério de rotura da forma:

$$k_I - k_{IC} = 0 \tag{3.2}$$

onde k_{IC} é uma característica intrínseca do material, designada por tenacidade à fractura.

Na realidade, este critério está ligado a uma propagação catastrófica da fissura desde que o valor de k_I atinja, por valores inferiores, o valor k_{IC}.

Num problema plano, o factor k_I é função da geometria da estrutura, em particular do comprimento da fissura existente, a, e dos parâmetros da carga, Q_i:

$$k_I = f(a, Q_i)$$

A determinação de k_{IC} é um problema de física experimental. A função $f(a, Q_i)$ pode determinar-se por métodos analíticos ou numéricos. A relação (3.2) permite calcular as acções admissíveis para uma estrutura com uma dada fissura. Pode, também, determinar-se os comprimentos de fissura admissíveis numa estrutura solicitada por condições de carga bem definidas.

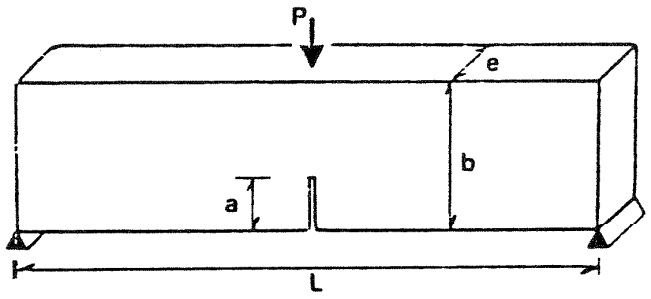


Fig. 3.9 - *Flexão três pontos*

Em relação aos materiais metálicos existe uma norma da "American Society for Testing and Materials (ASTM)" [45] que fixa os métodos experimentais para determinar os valores de k_{IC}. Utilizam-se provetes de formas simples para os quais

está calculada a função $f(a, Q_i)$ por exemplo provete com fissura lateral submetido a flexão três pontos (Fig. 3.9) e provete de tracção (Fig. 3.10). Determina-se a carga crítica Q_C, depois calcula-se k_{IC} com a ajuda de formulários. Os valores da tenacidade à fractura do aço obtidos por estes processos variam entre 50 e 200 $MPa\sqrt{m}$.

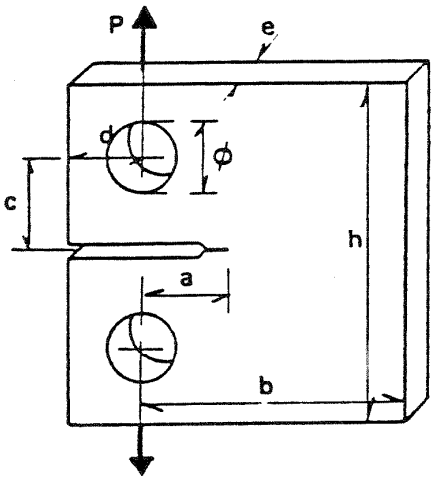


Fig. 3.10 - *Provete de tracção*

A validade do critério (expressão 3.2) é limitada às seguintes condições:

- existência de uma zona plástica na frente de fissura;
- efeito tridimensional dos provetes utilizados.

A teoria assenta sobre a elasticidade linear e sobretudo sobre a natureza plana do problema. Portanto, é bastante natural que se imponham restrições. A primeira diz respeito à espessura do provete. Os valores críticos referidos a uma unidade de espessura só são independentes desta se ela for superior a um dado valor B_0. Após numerosas experiências encontrou-se a seguinte expressão para B_0:

$$B_0 = 2,5(\frac{k_{IC}}{\sigma_0})^2 \tag{3.3}$$

onde σ_0 é o limite de elasticidade do material e k_{IC} é a sua tenacidade à fractura, patamar da figura 3.11.

A segunda restrição tem a ver com a plasticidade que deve estar limitada à frente de fissura. Mais uma vez se usa uma regra empírica análoga a (3.3). É necessário que o comprimento da fissura a e que a fissura sejam da mesma ordem de grandeza e que:

$$a > 2,5(\frac{k_{IC}}{\sigma_0})^2 \tag{3.4}$$

Quando a fissura é muito pequena, a condição precedente não se verifica. Isto quer dizer que nos situamos num caso de rotura com deformação plástica importante para o qual a presente teoria não se aplica. As expressões (3.3) e (3.4) servem para dimensionar os provetes utilizados na determinação da tenacidade à fractura do material. Quando não se tem uma ideia aproximada do valor da tenacidade à fractura, necessário em (3.3) e (3.4), pode utilizar-se a relação σ_0/E, onde E é o módulo de Young e recorrer a uma tabela que a norma ASTM fornece. Após os primeiros ensaios verifica-se se as condições (3.3) e (3.4) foram respeitadas, caso contrário repetem-se os ensaios com espessura e comprimento inicial de fissura superiores.

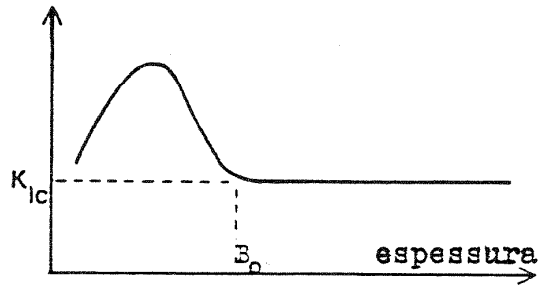


Fig. 3.11 - *Valor crítico de* k_I

Para o modo de rotura misto I e II, Erdogan e Sih [46] propõem um critério de propagação catastrófica da fissura logo que:

$$\sigma_\theta \sqrt{2\pi r} = k_{IC}$$

A propagação da fissura produz-se segundo uma direcção normal ao sentido da tracção máxima (Fig. 3.12), de tal forma que a componente de corte $\tau_{r,\theta}$ sobre a direcção da propagação é nula. Esta condição escreve-se:

$$\tau_{r\theta} = [k_I \sin\theta + k_{II}(3\cos\theta - 1)]\cos\frac{\theta}{2} = 0$$

donde: $\theta_1 = \pm\pi$ e $k_I \sin\theta_2 + k_{II}(3\cos\theta_2 - 1) = 0$.

O primeiro conjunto de valores θ_1, corresponde às condições de superfície livre da fissura e o segundo aos ângulos θ_2 para os quais a tensão σ_θ é máxima. Este critério aproxima-se do da curva intrínseca proposta por Mandel [36].

Na teoria de Mandel, há uma relação crítica entre as tensões no círculo r_0 (círculo de raio r_0 muito pequeno centrado na frente de fissura, onde a plasticidade é importante). Isto leva a considerar os factores k_I e k_{II} como parâmetros característicos:

$$f(k_I, k_{II}) = 0 \qquad (3.5)$$

com $k_I > 0$.

Para precisar a forma da relação (3.5), Mandel considera a hipótese de a fissura se propagar na direcção θ com a fissura existente quando no plano de tensões $\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{\theta r}$ o vector tensão:

$$\vec{T} = (\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{\theta r})$$

tendo o seu ponto de aplicação sobre a frente de fissura tem a sua extremidade sobre uma curva chamada curva intrínseca de resistência molecular.

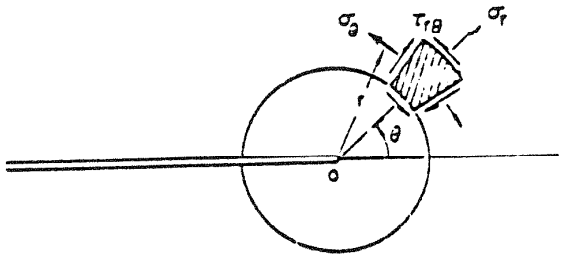


Fig. 3.12 - *Distribuição de tensões na frente de fissura*

Como nos colocamos no círculo de raio r_0, podemos situar no plano o vector de componentes:

$$\begin{cases} 4\sigma_{\theta\theta}\sqrt{2\pi r_0} = k_I(3\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2}) - 3k_{II}(\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2}) \equiv f(\theta) \\ 4\sigma_{\theta r}\sqrt{2\pi r_0} = k_I(\sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2}) + k_{II}(\cos\frac{\theta}{2} + 3\cos\frac{3\theta}{2}) \equiv g(\theta) \end{cases}$$

Fazendo variar θ descrevemos pelo ponto (f, g) uma curva fechada característica de cada solicitação. Esta curva depende de k_I e k_{II}. Logo que os factores de intensidade aumentem, a curva cresce e toca a curva intrínseca da rotura. O ângulo θ_0 correspondente ao ponto de contacto com a curva intrínseca é o ângulo de propagação (Fig. 3.13).

A curva intrínseca deverá ser determinada experimentalmente através da envolvente de todas as curvas de solicitação crítica. Não se dispõe, por enquanto, de dados suficientes para se fazer uma ideia da forma da curva intrínseca.

Mandel formulou as hipóteses de que a curva intrínseca é simétrica e de que ela admite no ponto de simetria um raio de curvatura bastante mais elevado que o das curvas de solicitação.

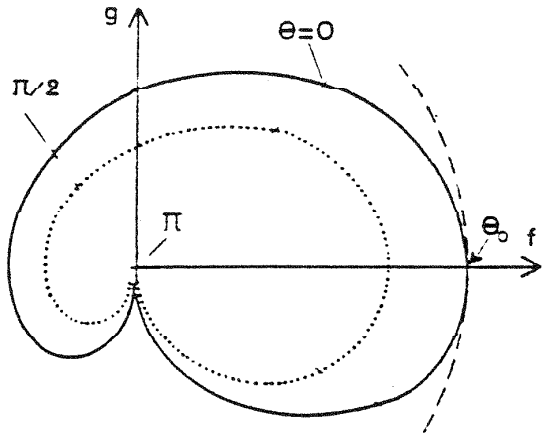


Fig. 3.13 - *Curvas de solicitação (.....) e curva intrínseca de Mandel (- - - - -)*

Da equação de equilíbrio:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta r}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial r} + 2\frac{\sigma_{\theta r}}{r} = 0$$

podemos tirar que:

$$g(\theta) = -\frac{2}{3} f'(\theta)$$

Podemos assim concluir que para $g(\theta) = 0$, temos $f'(\theta) = 0$, o que significa que a tangente à curva de solicitação, na intersecção com o eixo horizontal é vertical. Devido à hipótese sobre a curvatura da curva intrínseca, o ponto de contacto com esta encontra-se sempre sobre o eixo horizontal qualquer que seja a carga aplicada ou k_I e k_{II}. A fissura propagar-se-á então na direcção θ_0 definida por:

$$g(\theta_0) = 0$$

e pela condição suplementar que $f(\theta_0)$ seja máximo, o que corresponde a uma tensão máxima.

Por exemplo, verifica-se que:

$$k_I = 0,\ k_{II} \neq 0 \Rightarrow \theta_0 = \pm 70,5^0$$

$$k_I \neq 0,\ k_{II} = 0 \Rightarrow \theta_0 = 0$$

O ângulo próximo de 71°, obtido no primeiro caso, coincide com as conclusões das experiências de Erdogan e Sih [46].

3.3.6 Teoria de Griffith

Griffith [30] abordou o problema da rotura de corpos fissurados de um ponto de vista energético.

Considere-se um sólido elástico com uma fissura S. Logo que a propagação da fissura começa, a sua geometria altera-se. Consideremos a alteração desta geometria num processo real, a área aumentando de dS. A conservação da energia total do sistema escreve-se sob a forma seguinte:

$$dw_{tot} = dw_{elast} + dw_{ext} + dw_{cin} + dw_S = 0$$

com:

dw_{elast} = variação da energia elástica,

dw_{ext} = variação de energia potencial das forças exteriores ou trabalho destas forças trocado de sinal,

dw_{cin} = variação de energia cinética,

dw_S = energia suplementar dissipada para formação da superfície livre, ou $2\gamma dS$, com γ, energia superficial intrínseca.

Esta teoria pressupõe que a zona de deformação plástica local na frente de fissura seja de comprimento reduzido. Caso contrário Orowan [47] introduziu uma energia suplementar de plastificação cujo valor pode ser mil vezes superior ao da energia superficial intrínseca.

Suponhamos que o sistema se encontra em equilíbrio devido às solicitações exteriores e a uma fissura de área dada. A fissura só se propagará se a energia cinética aumentar ou seja $dw_{cin} > 0$. Seja

$$\frac{\partial}{\partial S}[w_{elast} + w_{ext}] + 2\gamma < 0$$

podemos definir o parâmetro G:

$$G = -[\frac{\partial}{\partial S}(w_{elast} + w_{ext})]_P = -[\frac{\partial w_{elast}}{\partial S}]_\delta$$

onde os índices P e δ dizem respeito a uma propagação de fissura com carga constante, P, ou afastamento constante, δ (o que equivale a afastamento Δ constante com rigidez da máquina de tracção, k_m, infinita [48]) (Fig. 3.14).

G, designa-se por taxa de libertação de energia de deformação ou força de propagação da fissura.

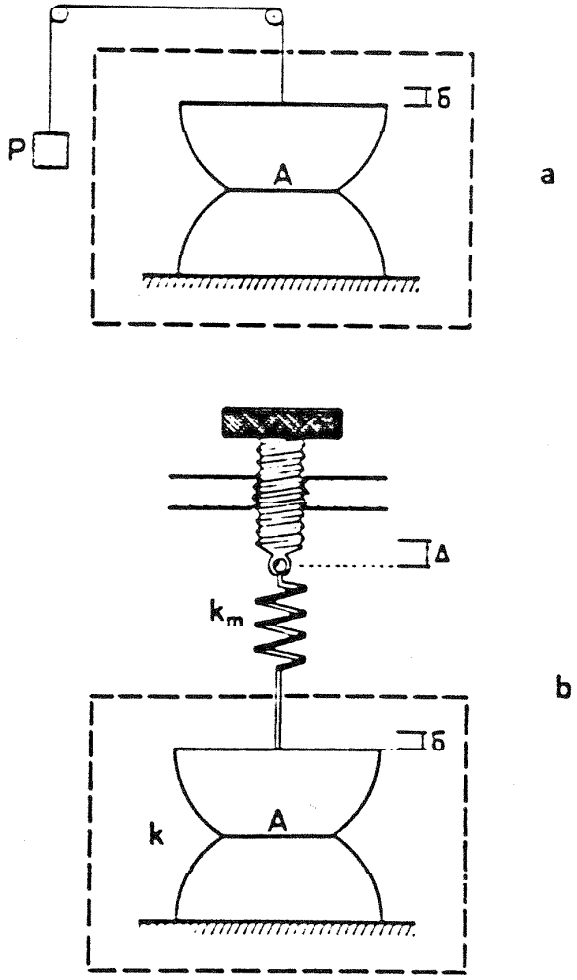


Fig. 3.14 - *Propagação da fissura a carga constante (a) e a afastamento constante (b).*

O critério de Griffith para o equilíbrio de uma fissura é dado pela relação:

$$G = 2\gamma \tag{3.6}$$

O equilíbrio definido pela relação (3.6) pode ser [49] estável (Fig. 3.15), instável (Fig. 3.16) ou indiferente. Um sistema termodinâmico submetido a uma dada tensão (P = constante ou δ = constante por exemplo) é estável se o potencial termodinâmico correspondente é mínimo [50], ou seja se a segunda derivada é positiva, o que se traduz por:

$(\frac{\partial G}{\partial S})_\delta > 0$ a afastamento constante

$(\frac{\partial G}{\partial S})_P > 0$ a carga constante

ou com mais generalidade:

$$(\frac{\partial G}{\partial S})_{\Delta} > 0$$

se a máquina de tracção tem uma rigidez finita, k_m. Pode demonstrar-se que a estabilidade cresce de forma monótona da solicitação a carga constante ($k_m = 0$) até à solicitação a afastamento constante ($k_m = \infty$) [51,52].

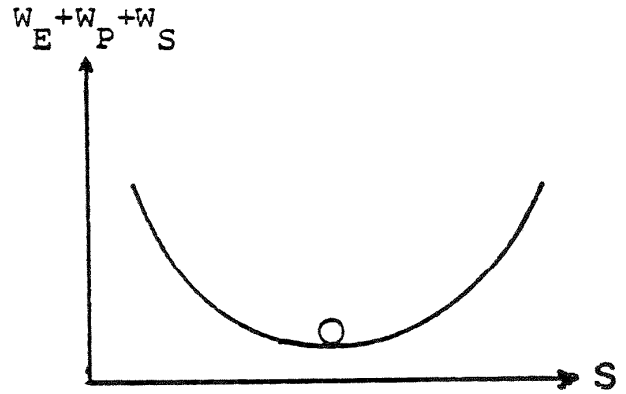


Fig. 3.15 - *Equilíbrio estável*

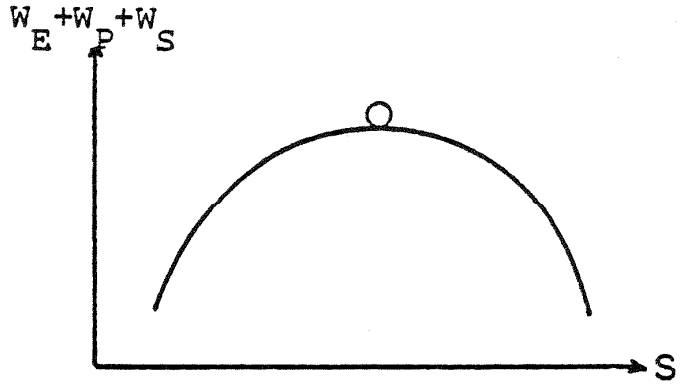


Fig. 3.16 - *Equilíbrio instável*

Se $G - 2\gamma \neq 0$, a superfície da fissura evolue espontaneamente por forma a diminuir o potencial termodinâmico. Se $G < 2\gamma$, a superfície fissurada diminui e a fissura recua; no caso contrário $G > 2\gamma$, a superfície fissurada aumenta com uma aceleração constante.

$G\,dS$ é a energia mecânica libertada quando a fissura aumenta de dS. A rotura das ligações interfaciais necessita da energia $2\gamma dS$, o excesso de energia $(G - 2\gamma)dS$

converte-se em energia cinética na ausência de processo dissipativo. Assim, $G - 2\gamma$ desempenha o papel de um motor para a progressão da fissura.

No caso de um material teoricamente elástico a fissura aceleraria a $G - 2\gamma$ constante até atingir a velocidade das ondas de Rayleigh. No caso de um sólido real visco-elástico, a fissura deve vencer os efeitos dissipativos, atrito viscoso por exemplo e alcança também, uma velocidade limite, função da temperatura, cujo valor máximo é a velocidade de Rayleigh [53].

3.3.7 Propagação subcrítica

Maugis e Barquins [54] proposeram uma condição de equilíbrio do tipo:

$$G - 2\gamma = 2\gamma\phi(V,T) \tag{3.7}$$

onde o segundo membro representa as perdas por atrito. A proporcionalidade destas perdas a 2γ é introduzida para ter em conta as translações verticais das curvas $G(V)$ quando o ambiente se modifica (Fig. 3.17). Exprime, ainda, o facto de na ausência de qualquer coesão, as perdas são nulas. A função ϕ, sem dimensões, é a função dissipação propriamente dita que depende unicamente da velocidade de propagação e da temperatura. Esta função é característica da propagação em modo I (abertura) para um dado material e pode representar-se por uma curva intrínseca.

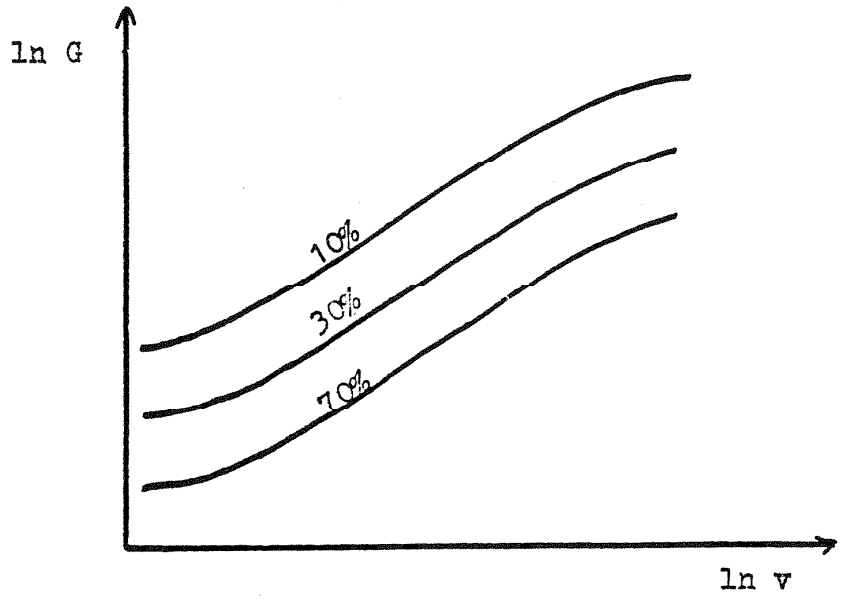


Fig. 3.17 - *Teor de restituição de energia em função da velocidade de propagação e da humidade relativa*

A equação (3.7) permite, assim, definir completamente a propagação subcrítica da fissura.

A equação (3.7) só é válida se:

- a energia cinética for desprezável;
- as perdas viscosas do material forem desprezáveis relativamente às que se verificam na frente de fissura;
- o atrito viscoso for proporcional ao trabalho termodinâmico;
- os resultados obtidos a diferentes temperaturas T, possam ser transportados para uma temperatura de referência T_S como para a construção de uma curva de referência ϕ, propriedade do material viscoelástico.

A equação (3.7) apresenta o interesse de separar nitidamente as propriedades superficiais (2γ) e viscoelásticas (ϕ) das propriedades elásticas, da geometria e das solicitações que aparecem em G. Assim, por exemplo para o contacto vidro- -poliuretano [53] a função ϕ varia da forma seguinte: $(a_T V)^{0,6}$ onde a_T é o factor de translação da transformação $W L F$ [55] dado por:

$$\log a_T = -\frac{8,86(T - T_S)}{101,6 + T - T_S}$$

onde $T_S = T_g + 50$

sendo T_g a temperatura de solidificação medida à frequência zero.

T é a temperatura a que se desenrola o ensaio.

As perdas viscoelásticas, localizadas na frente de fissura, estão ligadas à dependência em frequência da parte imaginária E'' do módulo complexo do material. Este módulo compõe-se de uma parte real E' e de uma parte imaginária E''. A frequência elevada (ou a baixa temperatura) o módulo de perda E'' diminui, de tal forma que o comportamento se torna elástico e a função $\phi(a_T, V)$ diminui rapidamente.

As propagações instáveis aparecem logo que a velocidade de propagação da fissura atinge um valor crítico v_c, ao qual corresponde uma taxa crítica de libertação da energia de deformação, G_c. Nesse instante, a fissura aumenta bruscamente de velocidade e o sistema evolui em seguida de acordo com a natureza do ensaio e em particular em função da variação de G com a área vencida pela fissura. Resulta, assim, que o valor de G_c representa o critério de observação da descontinuidade da velocidade que não deve ser confundido com o critério de iniciação de propagação da fissura (critério de Griffith). G_c pode ser mil vezes superior a 2γ.

Para explicar estes saltos de velocidade, assim como o mecanismo de propagação por ciclos ("stick-slip" em inglês) que se encontra com frequência, comecemos por considerar um modelo elementar de variação de G com a velocidade de propagação da fissura (Fig. 3.18). Este modelo consiste em sobrepor à curva característica da rotura frágil com efeitos dinâmicos (curva I), uma curva de forma simples traduzindo a evolução das perdas internas em função da velocidade (curva II) (Fig. 3.18) [34].

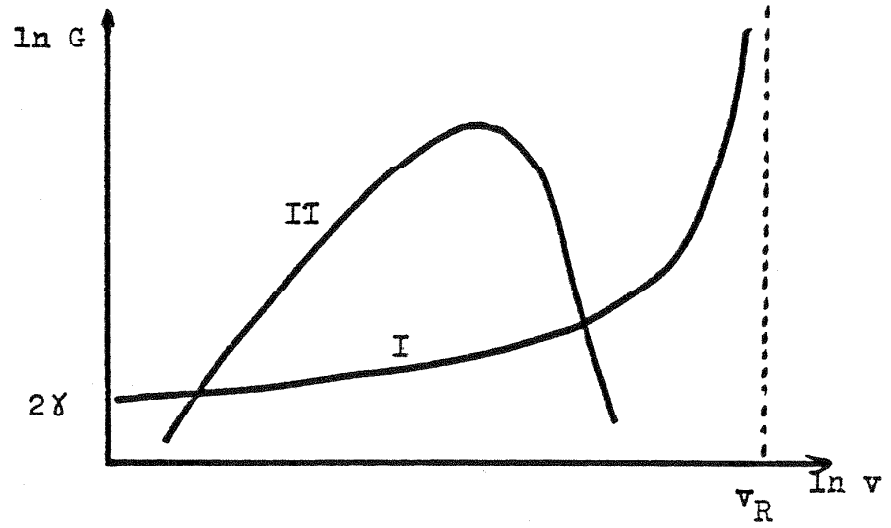


Fig. 3.18 - *Sobreposição da curva característica da rotura frágil (I) e da curva das perdas internas de velocidade (II).*

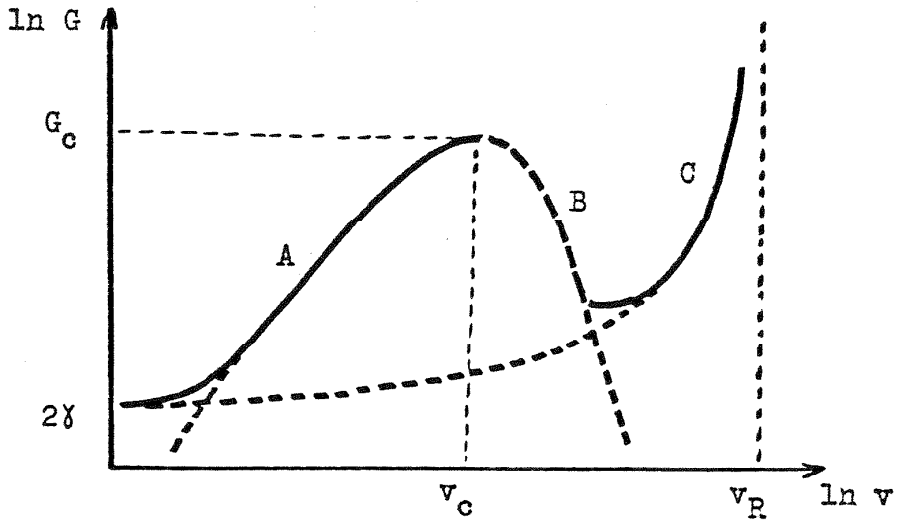


Fig. 3.19 - *Variação da taxa de libertação de energia de deformação com a velocidade de propagação da fissura.*

A curva obtida por este processo (Fig. 3.19) apresenta três zonas distintas, duas de resistência positiva (A e C), para as quais um aumento de G origina um aumento da velocidade de propagação e uma zona intermédia (B) de resistência negativa que é inacessível às experiências.

Esta curva simples permite compreender todos os comportamentos observados quando uma fissura se propaga num material para o qual as perdas por atrito se anulam com a velocidade. Como exemplo observemos o que se passa com uma geometria clássica como é a denominada por D C B (iniciais de "Double Cantilever Beam" que traduzido à letra dará Viga Dupla em Consola).

Logo que se aplica uma força F, suficiente para provocar a propagação (Fig. 3.20), a fissura propaga-se imediatamente à velocidade v_1, correspondente a $G(F)$ (Fig. 3.21) e depois acelera porque G cresce com o comprimento da fissura, como se pode deduzir da expressão seguinte:

$$G = \frac{12\,F^2\,a^2}{E\,b^2\,h^3}$$

sendo F a carga aplicada, a o comprimento da fissura, E o módulo de Young, b a espessura do provete e h metade da sua altura (Fig. 3.20). Observa-se assim uma propagação sub-crítica até á velocidade v_c. Neste instante, G só pode aumentar após um salto brutal de velocidade de v_c a v_2 para descrever a segunda zona de resistência positiva (C) (Fig. 3.21), até à rotura do provete. O salto de velocidade é acompanhado por uma emissão acústica característica. Se a força imposta for de tal grandeza que $G(F) > G_c$, passamos directamente à zona C, com uma velocidade crescente, a partir de v_3 por exemplo.

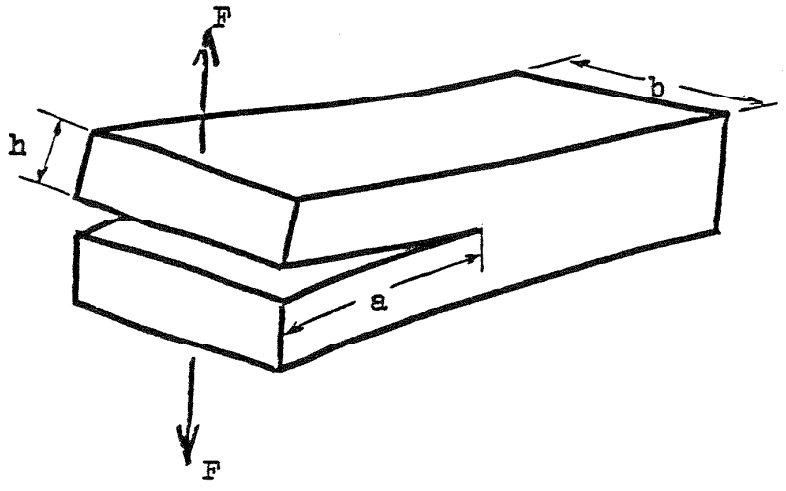


Fig. 3.20 - *Provete D C B com propagação a força constante*

Quando a propagação da fissura se produz com afastamento (δ) imposto (Fig. 3.22), a evolução do sistema é diferente porque G diminui quando o comprimento

da fissura aumenta:

$$G = \frac{3E\,h^3\,\delta^2}{16a^4}$$

A fissura propaga-se imediatamente a uma velocidade v_1, correspondente a $G(\delta)$ e diminui essa velocidade até uma posição de equilíbrio, seguindo a zona A da curva (Fig. 3.23). Se o afastamento imposto for tal que $G(\delta) > G_c$, a velocidade inicial, por exemplo v_1', diminui até v_2' ao longo da zona C. Neste momento, a diminuição de G conduz a um salto de velocidade de v_2' a v_3', o sistema evolui a seguir como anteriormente.

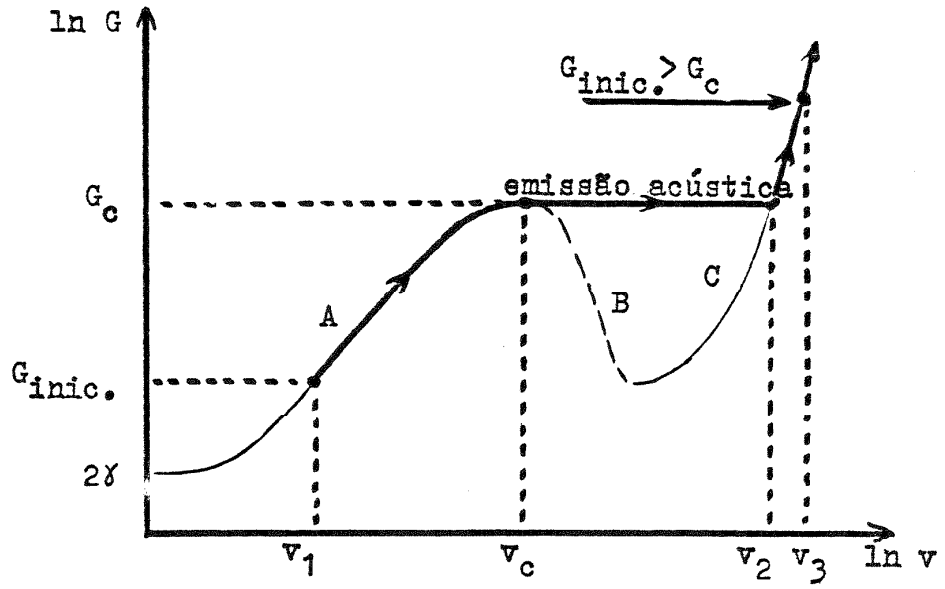


Fig. 3.21 - *Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação a força constante*

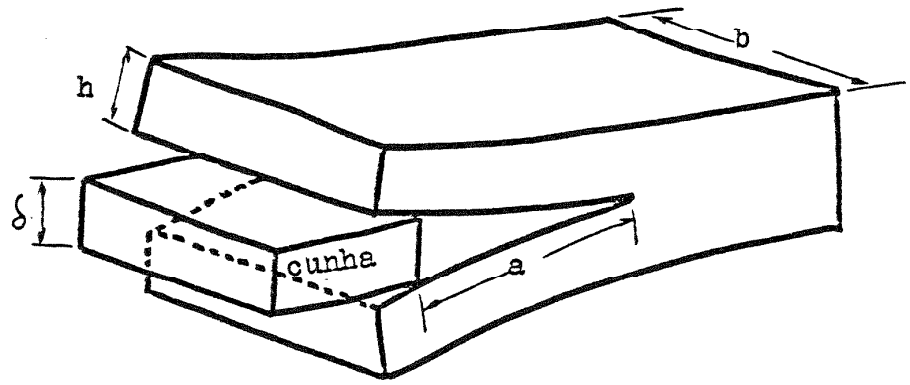


Fig. 3.22 - *Provete D C B com propagação com afastamento constante*

As propagações em ciclo (stick-slip) aparecem quando o provete D C B é ensaiado com uma velocidade de afastamento constante (Fig. 3.24). No princípio da experiência, a taxa de libertação da energia de deformação cresce com o deslocamento δ, de tal forma que a velocidade de propagação aumenta, ao longo da zona A, até ao valor crítico v_c. Como na experiência a carga constante, a esta fase de propagação subcrítica segue-se um aumento brusco da velocidade de v_c a v_1 que tem como consequência um aumento considerável do comprimento da fissura quando o afastamento δ se mantém quase constante. Verifica-se, então uma diminuição importante de G e em seguida uma diminuição, consequente, da velocidade de propagação da fissura. Esta diminuição efectua-se em duas fases: de forma contínua ao longo da zona C e de v_1 a v_2 e através de um salto brutal de v_2 a v_3. A velocidade é, então, bastante reduzida para que o aumento do deslocamento δ produza um aumento da energia elástica armazenada pelo sistema e reactive a fissura, cuja velocidade de propagação cresce de novo ao longo da zona A. Assim, estabelecem-se ciclos, que compreendem fases de propagação contínua (ao longo das zonas A e C) separadas por saltos de velocidade a afastamento constante (zonas horizontais) com uma sucessão de emissões acústicas, muito semelhantes às que se ouvem quando se desloca uma tira de fita adesiva do seu rolo.

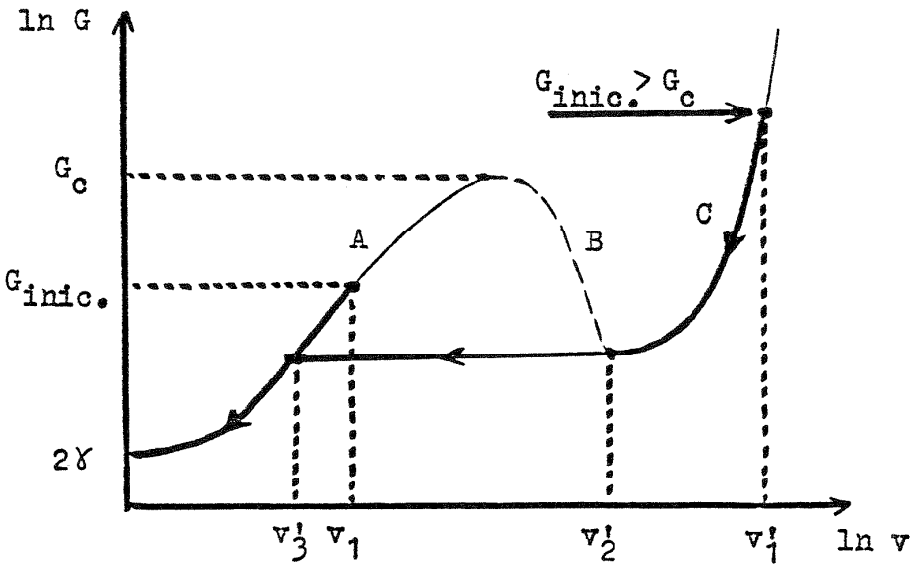


Fig. 3.23 - *Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação com afastamento constante.*

O modelo apresentado [34] permite compreender, igualmente, a aparição de saltos de velocidade precoces quando a alteração das condições ambiente provoca

uma diminuição da energia superficial. Tomemos o exemplo de dois provetes D C B idênticos submetidos à mesma força constante, um em ambiente seco e o outro em ambiente húmido (Fig. 3.25). A proporcionalidade das perdas de energia superficial implica que as curvas representativas dos dois casos sejam deslocadas verticalmente na proporção γ'/γ. No ambiente húmido a velocidade crítica v_c atinge-se para um teor de restituição $G'_c < G_c$ e, como consequência o salto de velocidade observa-se para um comprimento de fissura inferior ao medido quando a experiência se efectua em ambiente seco.

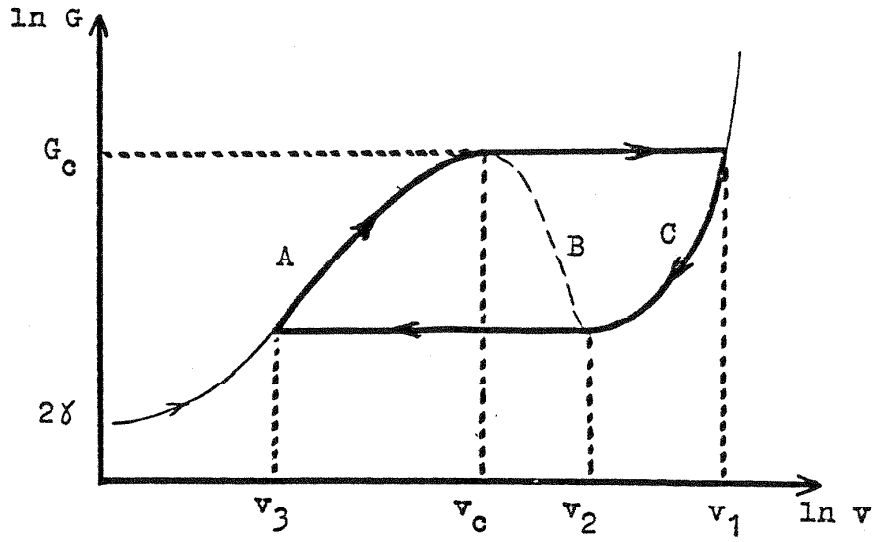


Fig. 3.24 - *Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação da fissura a velocidade de afastamento constante.*

Se a rotura se dá num líquido, o comportamento anterior altera-se ligeiramente pela interferência da viscosidade η do fluido ambiente (Fig. 3.26). A partir de uma dada velocidade de propagação v_t, dependente de η, as perdas por atrito viscoso no interior do líquido tornam-se predominantes e verifica-se que para um mesmo acréscimo de G, o aumento da velocidade é menor (zona D). Este efeito constata-se até que a velocidade de cavitação do líquido v_{cav} se atinja. Nesta altura, o sistema evolui espontaneamente através de um salto de velocidadde, de maior ou menor amplitude, até à zona A ou à zona C, se o valor de G correspondente a v_{cav} é inferior ou superior a G_c, respectivamente.

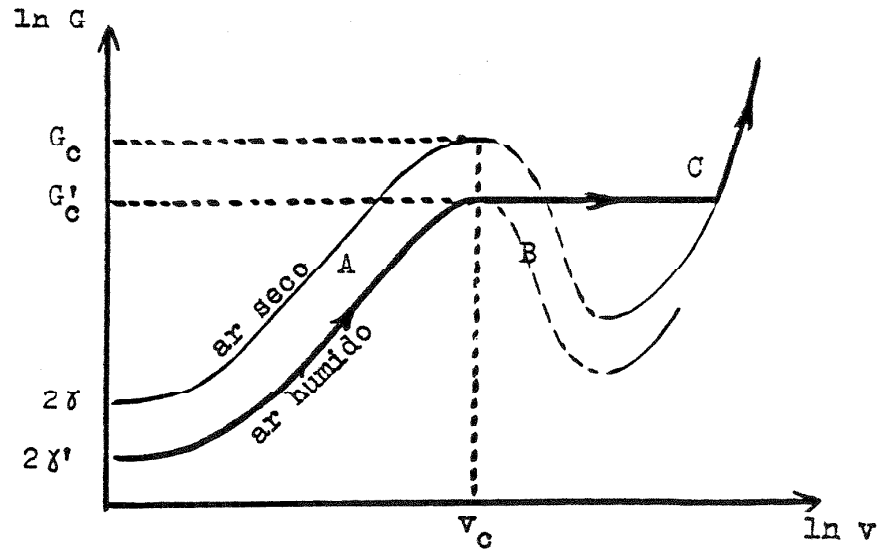


Fig. 3.25 - *Taxa de libertação da energia de deformação em função da velocidade de propagação e da humidade ambiente.*

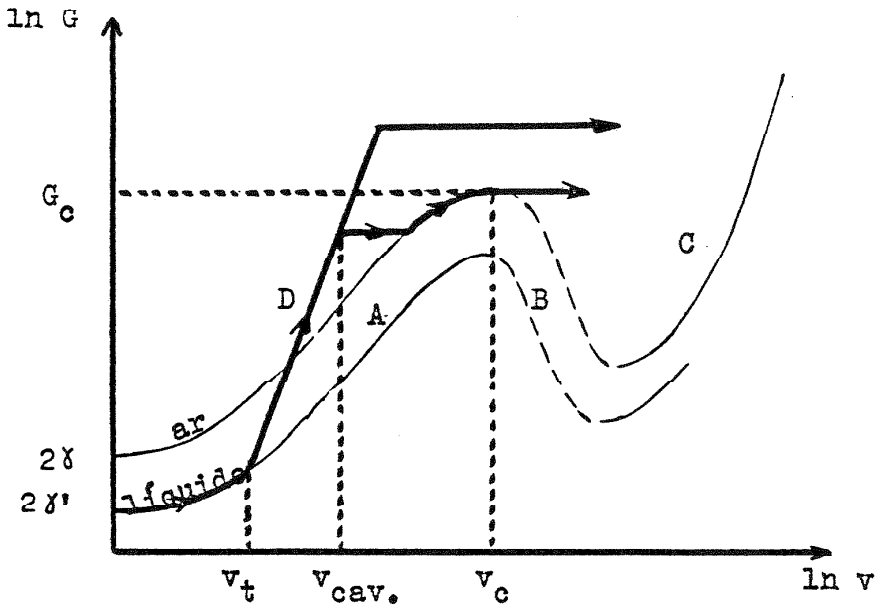


Fig. 3.26 - *Variação da taxa de libertação da energia de deformação com a velocidade de propagação quando a rotura se dá num líquido.*

3.3.8 Teoria de Barenblatt

Retomando o modelo de Inglis, Barenblatt [56] supõe que a fissura não adquire uma forma elíptica sob o efeito de um campo de tensão uniforme $\sigma_y = \sigma$, mas torna-se achatada nas extremidades e os bordos da fissura afastam-se um do outro na parte central (Fig. 3.27). Ao longo de um comprimento d, a partir de cada extremidade da fissura, intervêm forças de coesão interatómicas que se opõem à abertura do entalhe nas suas extremidades, exercendo-se entre as partículas de um lado e do outro do plano da fissura. Estas forças, F, têm a particularidade de dependerem do afastamento y destas partículas (Fig. 3.28).

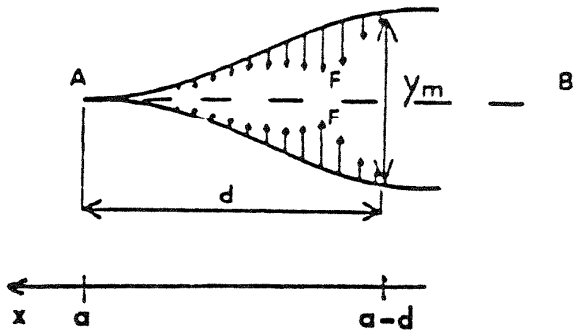


Fig. 3.27 - *Forma da fissura*

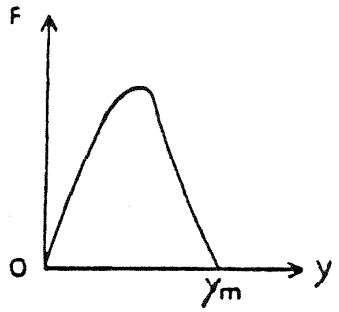


Fig. 3.28 - *Variação das forças de coesão interatómica com o afastamento das partículas.*

Ao longo da fissura distinguem-se, assim, três zonas:

$x < a - d$: ausência de interacções entre os dois bordos;
$a - d < x < a$: interacções não lineares;
$x > a$: interacções elásticas lineares.

Fazendo desaparecer a singularidade em $x^{-\frac{1}{2}}$, Barenblatt [56] mostra que as forças de coesão atingem uma distribuição limite F_m, tal que:

$$\int_0^d F_m(\xi)\xi^{\frac{1}{2}}d\xi = k$$

onde:

k è o módulo de coesão e

$\xi = a - x$

Enquanto a zona onde se fazem sentir as forças de coesão se mantiver pequena, temos, em deformação plana:

$$\frac{dw_{elast}}{da} = \frac{-2(1-\nu^2)}{\pi E}k^2$$

Se o trabalho das forças exteriores for nulo, encontramos uma relação entre a tensão superficial de Griffith e as tensões de coesão de Barenblatt, dada pela equação:

$$k^2 = \frac{\pi E \gamma}{1-\nu^2}$$

3.3.9 Método da complacência

Consideremos um sólido infinito contendo uma fissura de comprimento inicial a [57]. Durante um ensaio o ponto de aplicação da carga, de intensidade P, tem um delocamento igual a u. Sobre um gráfico de variação de u com P, designa-se por complacência, C a grandeza u/P. Irwin demonstrou que a variação ∂C, da complacência com o crescimento da fissura está directamente ligada à taxa de libertação da energia de deformação G em modo I, no caso de um material com comportamento elástico linear:

$$G = \frac{P^2}{2B}\frac{\partial C}{\partial a} \; (com\ P\ constante)$$

sendo B a espessura do provete.

3.3.10 Equivalência entre as teorias energéticas e os factores de intensidade da tensão

Embora, baseadas em conceitos diferentes, as teorias de Irwin, Griffith e Barenblatt aproximam-se.

Calculando a variação das energias elásticas e potencial das forças exteriores com o crescimento da fissura, obtém-se a relação seguinte, na proximidade da frente de fissura [57]:

$$G = \frac{1}{E'}.(k_I^2 + k_{II}^2) + \frac{1}{2G'}\, k_{III}^2$$

com:

$E' = E$ em estado plano de tensão,

$E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ em estado plano de deformação

e G' = módulo de corte.

Temos, assim, que segundo a natureza do problema e a comodidade, podemos utilizar indiferentemente uma ou outra das teorias ou mesmo ambas. A teoria energética apresenta, no entanto, uma certa vantagem pela consideração de estados de deslocamento complexos, enquanto que isto não é possível, em geral, para os factores de intensidade de tensão. Com efeito, uma vez que o campo de tensão é proporcional a vários factores k, é necessário recorrer ao princípio da sobreposição de efeitos sobre os tensores de tensões.

3.4 Integral J de Rice

Consideremos um sólido homogéneo com comportamento elástico, linear ou não linear, livre de todas as forças volúmicas. Num espaço bidimensional, as tensões dependem, apenas, das coordenadas cartesianas x_1 e x_2. Suponhamos que este sólido contém uma fissura de faces S^+ e S^- paralelas ao eixo dos xx e que a sua frente de fissura tem a forma descrita pelo arco S_t. A ponta da fissura coincide com a origem das coordenadas e a fissura inicia-se na superfície exterior do sólido para só se considerar uma singularidade rectilínea (Fig. 3.29).

Define-se densidade de energia elástica através da expressão seguinte:

$$w = w(x_1, x_2) = w(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

onde $\varepsilon = [\varepsilon_{ij}]$ é o tensor das pequenas deformações.

Designa-se por integral J de Rice [58,59] o seguinte integral:

$$J = \int_\Gamma (w dx_2 - T\frac{\partial u}{\partial x_1} dS)$$

onde Γ é um contorno orientado de tal forma que as extremidades A e B estão sobre as faces S^+ e S^-, T é o vector tensão sobre o contorno Γ definido por $T_i = \sigma_{ij}, n_j$, com n_j a normal exterior orientada, u é o vector deslocamento e dS é o elemento do arco Γ.

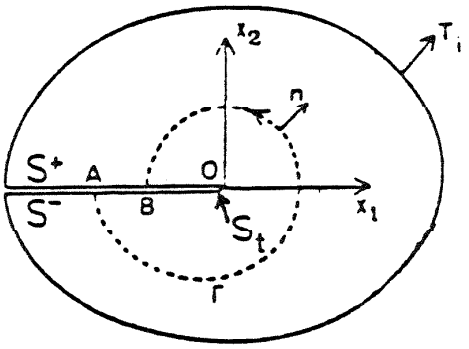


Fig. 3.29 - *Frente de fissura*

Rice demonstrou que no caso elástico, o valor do integral é independente do contorno de integração escolhido. Note-se que a hipótese de fissura rectilínea é essencial para se obter este resultado porque o integral deve anular-se sobre as faces da fissura.

Para um problema elástico linear, a escolha do contorno de integração permite ligar J directamente aos parâmetros k_L e G já conhecidos. Um contorno circular centrado na ponta da fissura permite ligar J a k_L e mostrar que o seu valor é idêntico ao de G [57].

Num sólido elástico não linear pode demonstrar-se [59] que J é igual à taxa de libertação da energia de deformação $G = -dP/da$, onde P é a energia potencial e a o comprimento da fissura segundo x_1.

3.5 Estudo da zona plástica na frente de fissura

Como se viu, anteriormente, a teoria clássica da elasticidade prevê uma tensão infinita e deformações muito elevadas no fundo do entalhe. Na realidade, o valor das tensões está limitado pelas características do material, critério de plasticidade ou critério de rotura. Se se produz uma plastificação na frente de fissura é necessário conhecer a importância desta perturbação.

3.5.1 Dimensão da zona plástica

Num modelo bidimensional, Irwin [60,61,62] supõe que na zona plástica de comprimento 2 R_P (a partir da frente de fissura) a tensão normal σ_y é igual ao limite de elasticidade σ_e do material e que fora desta zona o desenvolvimento das tensões é igual ao que se determina numa análise puramente elástica, se decalada de R_P (Fig. 3.30).

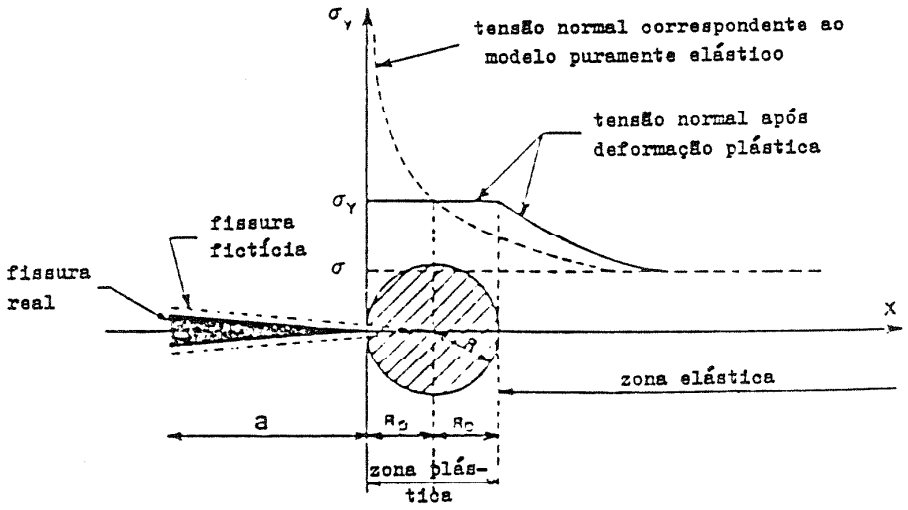


Fig. 3.30 - *Variação de tensões e dimensão da zona plástica na frente de fissura*

Estas considerações conduzem a uma fissura fictícia de comprimento $2(a + R_P)$ com:

$$R_P = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{k_I}{\sigma_e}\right)^2 \text{ em estado plano de tensão e}$$

$$R_P = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{k_I}{\sigma_e}\right)^2 \text{ em estado plano de deformação.}$$

Este modelo, embora aproximativo, no que se refere ao comprimento e à forma da zona plástica, é muito útil do ponto de vista prático porque serve para a determinação de k_{Ic} e de G_c quando esta zona é pequena em relação às dimensões da fissura.

Considerando em simultâneo o modelo de Barenblatt e o que Irwin propõe para a zona plástica, Dugdale [63,64] admite que (Fig. 3.31):

- a deformação plástica tem um comprimento de $2(a + R_D)$;
- na zona plástica o material está submetido a uma tensão uniforme normal ao plano da fissura e igual ao limite de elasticidade σ_e do material;

- a dimensão transversal desta zona é muito pequena, de tal forma que se pode limitar, inferiormente, o domínio elástico por uma elipse achatada de eixo maior $2(a + R_D)$;
- o comprimento R_D da zona plástica, de ambos os lados da fissura, é tal que não há singularidade de tensão nas extremidades da elipse achatada.

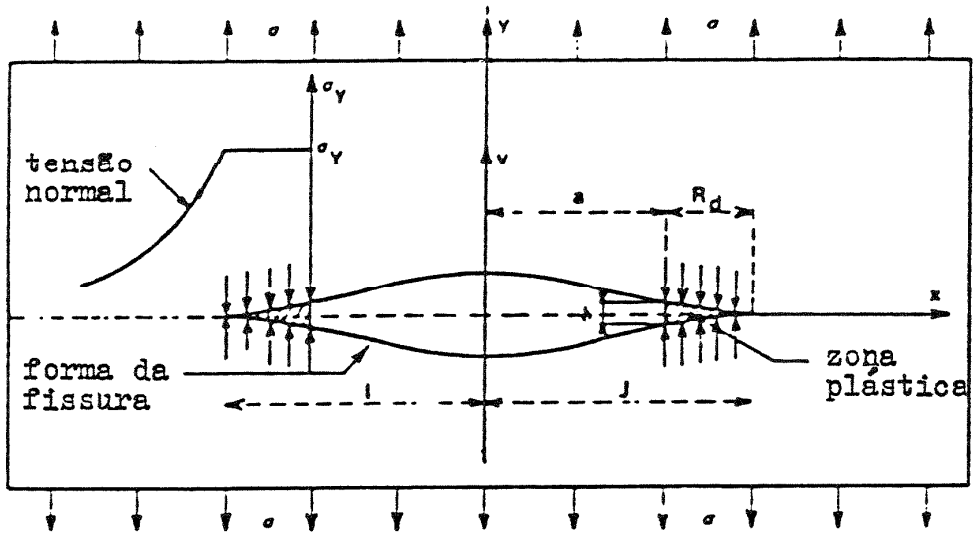


Fig. 3.31 - *Dimensões da zona plástica e distribuição de tensões numa laje solicitada por uma tensão uniforme σ.*

Nestas condições, se $R_D \ll a$, o comprimento R_D é dado pelas expressão:

$$R_D = \frac{\pi^2 a \sigma^2}{8\sigma_e^2}$$

3.5.2 Forma da zona plástica na frente de fissura

Na realidade, a forma da zona plástica não é circular [57]. Uma forma mais correcta desta zona pode ser determinada através da análise das condições limite de elasticidade em pontos fora do eixo dos xx [65,66]. Para isso, deve utilizar-se um critério de elasticidade apropriado. Tanto o critério de Tresca como o de Von Mises são, geralmente, aplicados. A forma das zonas plásticas é diferente em estado plano de tensão e em estado plano de deformação (Fig. 3.32). Supondo que temos um estado plano de tensão na proximidade dos bordos livres do sólido estudado e

um estado plano de deformação no seu centro, este sólido terá uma zona plástica na frente de fissura, maior junto aos bordos livres que no centro (Fig. 3.33).

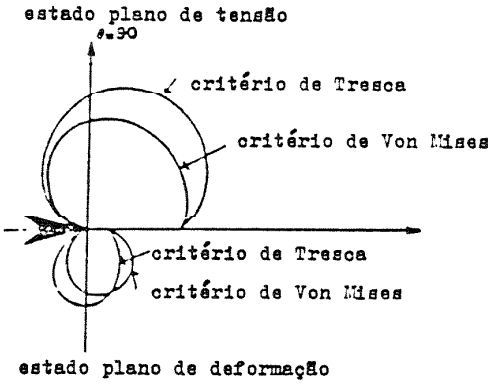


Fig. 3.32 - *Forma da zona plástica dada pelos critérios de Tresca e de Von Mises*

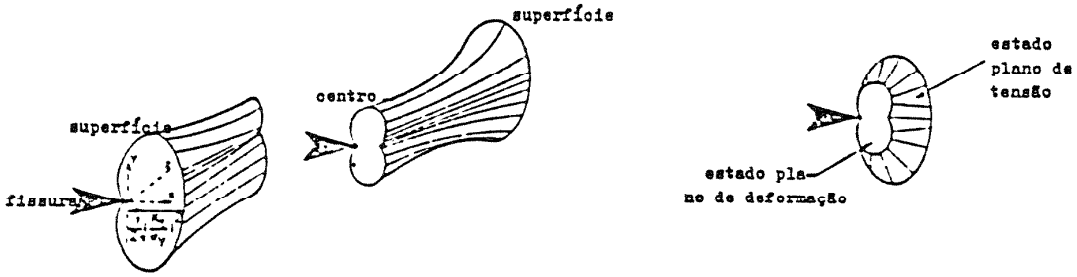


Fig. 3.33 - *Forma das zonas plásticas à superfície do provete e no seu centro.*

Capítulo 4

Métodos numéricos aplicados à mecânica da fractura

4.1 Introdução

Os métodos numéricos surgem para resolver problemas envolvendo equações de derivadas parciais, dos quais não se podem obter soluções analíticas. Trata-se, pois, de métodos aproximados. O método das diferenças finitas, o dos elementos finitos, o dos elementos de fronteira, o dos trabalhos virtuais, etc., são métodos aproximados. Todos eles se podem considerar casos particulares do princípio dos resíduos pesados. O objectivo de uma solução aproximada é reduzir a equação diferencial (ou o sistema de equações diferenciais) mais as condições de fronteira a um sistema de equações algébricas. Isto consegue-se dividindo o domínio da(s) função(ões) desconhecida(s) num certo número de subdomínios ou elementos, em cada um dos quais se admite para a função deslocamento (ou função de tensão) uma dada lei de variação [67].

Martin e Carey [68] afirmam que este tipo de método terá começado a utilizar-se na antiguidade pelos geómetras egípcios no cálculo da área do círculo e na determinação de π.

O objectivo dos métodos baseados no princípio dos resíduos pesados é de tornar os erros tão pequenos quanto possível quer no domínio, quer na fronteira. As formas de conseguir esse objectivo são variáveis e cada uma dá origem a um método dos resíduos pesados. Pesados porque se introduz uma função peso para modificar a distribuição dos resíduos ou erros e facilitar a redução do erro médio.

4.2 O método dos elementos finitos

4.2.1 Princípio e história

A análise por elementos finitos aplicada à mecânica dos meios contínuos é um método bastante recente. O seu ponto de partida situa-se por volta de 1950, altura em que surgiram os primeiros instrumentos de cálculo automático. Em 1956, Turner [69] propôs o que é considerado como essência do método, assemelhando o meio contínuo a um conjunto de elementos simples; as tensões, supondo-se aplicadas nas fronteiras do elemento, eram representadas por forças estaticamente equivalentes aplicadas nos nós do elemento. A resolução dos problemas elásticos em mecânica dos meios contínuos reduz-se, então, à resolução analisando as estruturas em elementos, satisfazendo, para a estrutura discretizada, o equilíbrio das forças, a compatibilidade dos deslocamentos e as leis de comportamento do material.

Actualmente, devido ao rápido desenvolvimento dos computadores e ao interesse que por eles mostram os engenheiros e cientistas, o método encontra aplicação em variados domínios e constitui um método de resolução fiável dos mais complexos problemas para os quais a resolução analítica continua impossível [70 a 74].

4.2.2 Discretização

Uma das características do método dos elementos finitos é a discretização do espaço em estudo em subdomínios de formas geométricas simples, os "elementos finitos", tendo em comum as suas fronteiras e escolhidos de tal forma que a sua união represente o melhor possível o sólido real. As fronteiras dos elementos designam-se por "linhas nodais" e as suas intersecções por "pontos nodais" ou "nós" (Fig. 4.1).

Escolhido um sistema de eixos coordenados, numerados os elementos e os nós de forma adequada, o método interessa-se, em primeiro lugar, pelos elementos considerados um a um. A distribuição das tensões aplicadas nas fronteiras do elemento transforma-se em forças equivalentes aplicadas nos nós do elemento e que são designadas por "forças nodais".

A resolução consiste em exprimir o valor das incógnitas do problema (que consideraremos, no que se segue, serem os deslocamentos) nos nós do elemento em função das forças nodais.

Da distribuição de deslocamentos segundo uma lei arbitrada no interior deduzem-se as extensões e com a lei de Hooke obtém-se o campo de tensões que tem de estar em equilíbrio com as forças nodais. Esse equilíbrio é expresso pela equação:

$$F_E = R_E U_E$$

com:

F_E matriz das forças nodais do elemento E

U_E matriz dos deslocamentos nodais do elemento E

R_E é designada por matriz de rigidez do elemento que exprime as forças que é necessário aplicar nos nós para produzir uma unidade de deslocamento, representa as características geométricas do elemento e o comportamento do material que o constitue.

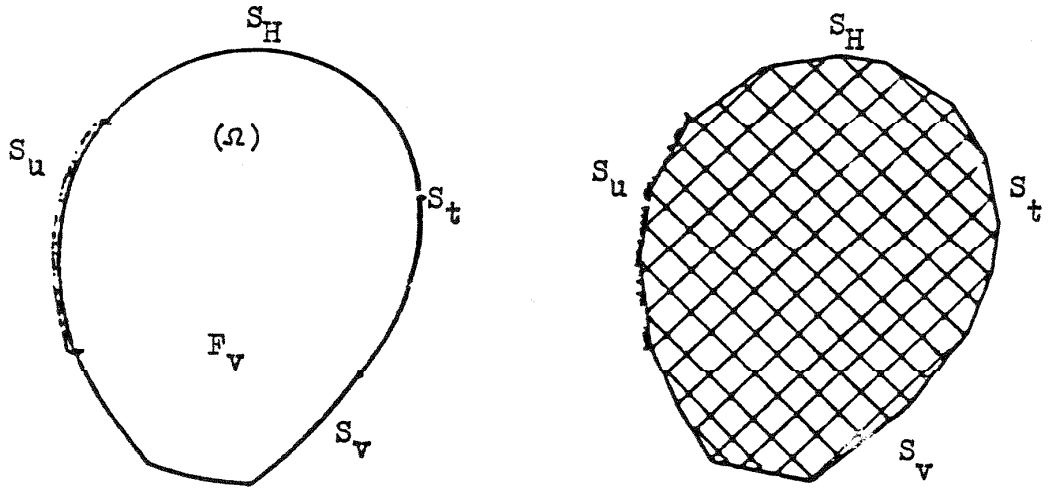


Fig. 4.1 - *Discretização de um sólido*

Para qualquer ponto do elemento, os deslocamentos determinam-se por interpolação dos deslocamentos nodais em função da posição do ponto em relação aos pontos nodais.

A determinação dos deslocamentos nodais necessita da realização das seguintes etapas [33]:

- escolha das funções de interpolação que darão o campo dos deslocamentos em função das coordenadas locais e dos deslocamentos nodais;
- integração das equações de cada elemento;
- montagem das equações globais da estrutura.

4.2.3 Escolha das funções de interpolação

4.2.3.1 Funções de deslocamento

As funções de deslocamento definem de forma única o campo de deslocamentos de todos os pontos do elemento aproximando os deslocamentos desconhecidos, através de uma decomposição seguindo uma base de funções conveniente.

Escreve-se então:

$$u_j(x,y) = a_i f_i(x,y) \tag{4.1}$$

onde $f_i(x,y)$ é a base de funções escolhida e a_i um conjunto de parâmetros.

É corrente, utilizar-se um desenvolvimento polinomial:

$$u_j(x,y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + ...$$

A equação (4.1) escreve-se, em notação matricial:

$$U = [u_i] = [f][A].$$

4.2.3.2 Funções de interpolação

Com a utilização de funções de interpolação faz-se corresponder os deslocamentos de um ponto do elemento aos deslocamentos nodais do elemento com o auxílio de funções deslocamento nas quais se introduz as coordenadas nodais:

$$U_E = [f(X_E, Y_E)][A] \tag{4.2}$$

Combinando as equações (4.1) e (4.2), temos:

$$U = [f(X,Y)][f(X_E,Y_E)]^{-1} U_E = N U_E \tag{4.3}$$

onde as funções N, definidas por:

$$N = [f(X,Y)][f(X_E,Y_E)]^{-1}$$

são designadas por funções de interpolação. Para evitar os cálculos de $[f(X_E,Y_E)]^{-1}$, escolhe-se geralmente, as funções de interpolação N directamente.

4.2.4 Integração das equações elementares

Há três grandes grupos de métodos para integrar as equações elementares:

- os métodos dos deslocamentos (ou das rigidezes);
- os métodos de equilíbrio das forças (ou das flexibilidades);
- os métodos mistos.

Nos primeiros, as incógnitas do problema são os deslocamentos; as condições de compatibilidade são satisfeitas de início, escreve-se e resolve-se em seguida as equações de equilíbrio para obter os deslocamentos nodais. O método dos deslocamentos é muito utilizado devido, principalmente, à largura da banda do sistema linear a resolver, mais pequena que nos outros métodos. Este método pode, no entanto, dar resultados afectados pelas variações da geometria e das características do material.

Quando nos interessamos principalmente pela distribuição de tensões ou no caso de problemas de equilíbrio limite, o método de equilíbrio (onde as incógnitas são as funções de tensão generalizadas) seria o mais indicado; as equações de equilíbrio dos nós e do elemento são, em primeiro lugar, satisfeitas, depois escreve-se as equações de compatibilidade para obter as forças desconhecidas e as distribuições de tensões.

Com os métodos mistos, deslocamentos e tensões são incógnitas. No que se segue limitar-nos-emos ao método dos deslocamentos que é considerado [75] o método mais usado.

A relação estreita entre o método dos elementos finitos e os métodos de análise das estruturas conduziu os investigadores a utilizar métodos variacionais para abordar problemas mais complexos; o método dos deslocamentos é uma aplicação do princípio variacional da energia potencial mínima.

Os métodos variacionais envolvem o princípio dos trabalhos virtuais, que, para um elemento, se enuncia da forma seguinte:

$$\sum_E F_E^T U_E = \int_E \sigma \epsilon dE$$

F_E, U_E são as forças e deslocamentos nodais que podem ser reais ou virtuais,

σ são as tensões internas e

ϵ as deformações internas do elemento E.

Este princípio exprime a igualdade do trabalho virtual das cargas exteriores e do trabalho virtual interno de deformação da estrutura.

Tensões e deformações num ponto do elemento são ligadas por relações "tensões-deformações" que traduzem a lei de comportamento do material; por exemplo,

no caso da lei do comportamento elástico linear, as relações "tensões-deformações" são a lei de Hooke generalizada:

$$\sigma = D\varepsilon \tag{4.4}$$

onde D, matriz de elasticidade, contém as propriedades elásticas do material; por exemplo, o módulo de elasticidade longitudinal, E e o coeficiente de Poisson, ν, no caso de um material isotrópico.

As extensões, por sua definição, exprimem-se, em termos de deslocamentos, pela relação

$$[\varepsilon] = B\,U_E \tag{4.5}$$

Para o caso de deformações planas e na hipótese de deformações infinitesimais temos:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \end{bmatrix} = B\,U_E$$

onde B é uma matriz que faz intervir as derivadas parciais e através delas as derivadas parciais das funções de interpolação.

Combinando as equações (4.4) e (4.5), pode escrever-se:

$$\sigma = DBU_E$$

Para um deslocamento virtual U_E^* nodal, o trabalho exterior das forças nodais F_E escreve-se:

$$W_E = F_E^T U_E^*$$

e o trabalho total interno que é dado pela expressão:

$$W_i = \int_E \sigma^T \varepsilon^* dE$$

escreve-se, tendo em conta as relações (4.3), (4.4) e (4.5):

$$W_i = \int_E U_E^T B^T DBU_E^* dE$$

porque D é simétrica.

Escrevendo $W_E = W_i$, vem:

$$R_E = \int_E B^T DB\, dE$$

e atendendo a que R_E é também simétrica somos conduzidos à equação seguinte, enunciada no número 4.2.2.:

$$F_E = R_E\, U_E \tag{4.6}$$

4.2.5 União dos elementos

As equações do tipo (4.6) obtêm-se para cada um dos elementos. Estas equações combinam-se de forma a obter-se as equações globais para o conjunto da estrutura que se escrevem:

$$F_G = R_G U_G \tag{4.7}$$

onde

F_G é a matriz global das forças nodais

U_G é a matriz global dos deslocamentos nodais

R_G é a matriz de rigidez global.

$$F_G = [F_{x_1} \ldots\ldots F_{x_n},\ F_{y_1} \ldots\ldots F_{y_n}]$$

$$U_G = [u_1 \ldots\ldots u_n,\ v_1 \ldots\ldots v_n]$$

Com n, número de nós da estrutura discretizada.

As equações globais obtêm-se supondo que o conjunto da estrutura discretizada está em equilíbrio sob o efeito das forças nodais F_G e respeitando as condições de continuidade da estrutura. Isto efectua-se escrevendo a igualdade dos deslocamentos nos nós comuns dos elementos adjacentes. Por exemplo, para o elemento k:

$$U_E^k = P_K U_G$$

onde P_k é uma matriz em que todos os seus termos são nulos, excepto aqueles que permitem escrever a igualdade dos deslocamentos dos nós do deslocamento k na matriz U_E e na matriz U_G.

Considerando o sólido submetido a deslocamentos impostos u_i^d sobre S_u e a forças F_j^d sobre S_t (Fig. 4.2), vem:

$$\begin{aligned} U_i &= u_i^d \ sobre \ S_u \\ F_j &= F_j^d \ sobre \ S_t \end{aligned} \tag{4.8}$$

O conjunto das equações (4.7) e (4.8) constitui o sistema linear discretizado. A existência e a unicidade da solução encontram-se asseguradas pelas propriedades de simetria e pela positividade da matriz de rigidez global.

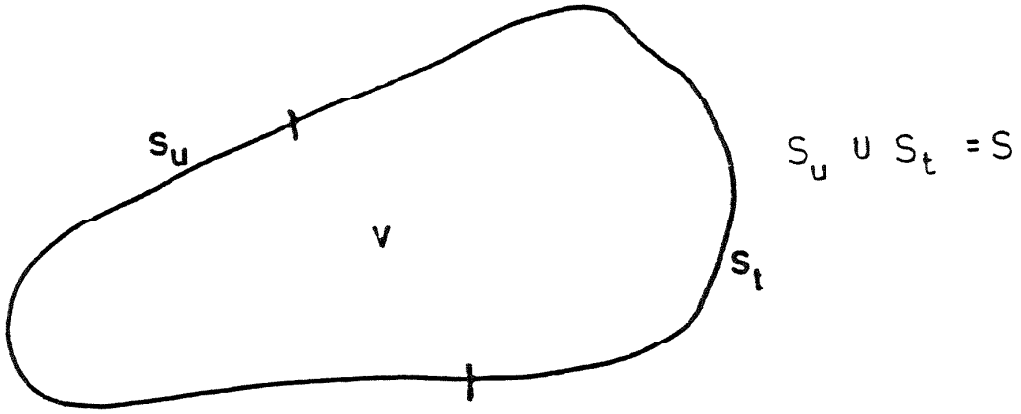


Fig. 4.2 - *Divisão da fronteira em S_u e S_t*

4.3 O método dos elementos fronteira

4.3.1 Introdução

O princípio do método dos elementos fronteira [76,77] consiste na transformação das equações de estado que descrevem o comportamento das funções incógnitas no interior e sobre a fronteira de um domínio, numa equação integral ligando as funções incógnitas e algumas das suas derivadas aos valores que elas tomam sobre a fronteira. Ou seja, numa estrutura trabalhando em domínio elástico, submetida a condições de fronteira descritas sob a forma de deslocamentos u na parte S_u da fronteira e de tensões t sobre a parte S_t da fronteira, esta equação integral aparecerá como uma relação entre as tensões e os deslocamentos desconhecidos com os valores que eles tomam na fronteira (Fig. 4.2).

A resolução do problema dá-nos os deslocamentos e as tensões desconhecidos sobre a fronteira e através de uma relação integral simples estas informações podem obter-se em qualquer ponto interior da estrutura.

Uma das vantagens desta técnica é a de substituir um problema a 3 (ou 2) dimensões por um problema a 2 (ou 1) dimensões o que simplifica a entrada de dados e a exploração dos resultados. Uma outra vantagem [78] é a de, geralmente, os elementos fronteira se prestarem à representação de regiões com concentração de tensões melhor que os elementos finitos, embora isto dependa do tipo de função de aproximação utilizada. O tratamento numérico do problema conduz a uma discretização da fronteira, como será indicado adiante, e apresenta a vantagem

sobre outras técnicas, como a dos elementos finitos, de não exigir a discretização do domínio.

Por outro lado, quando se instala o sistema de equações lineares respectivo, a matriz respectiva não tem a forma de banda, como nos elementos finitos, mas é completa o que se traduz por um aumento do tempo de cálculo e pelo recurso a uma repartição do domínio em subdomínios por forma a reduzir esse tempo.

Como este método de cálculo foi desenvolvido em particular para o tratamento de problemas com singularidades específicas (bordos vivos, entalhes, peças fissuradas) [79 a 82] vamos expor brevemente o seu princípio para problemas elásticos assim como o método de resolução.

4.3.2 Fórmulas gerais

Consideremos um problema elástico em meios homogéneos e isotrópicos. O comportamento de um domínio V limitado pela fronteira S sobre a qual são impostos os deslocamentos u e as tensões t define-se pela equação de Navier:

$$\nabla u_i = (\lambda + \mu) u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} = -f_i$$

onde:

∇ representa o operador laplaciano

$u_i(x)$ o deslocamento do ponto x de coordenadas x_i

$u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

f_i as forças volúmicas

λ, μ os coeficientes de Lamé.

A esta equação de equilíbrio associam-se as seguintes condições limites:

- sobre os deslocamentos, $u_i = u_i^d$ sobre S_u
- sobre as tensões, $T_j = T_i^d$ sobre S_t

Quer seja a duas dimensões (deformação plana, $u_3 = 0$ ou tensão plana, $\sigma_{i_3} = 0$) ou a três dimensões, é possível encontrar uma solução correspondente à equação de comportamento com o auxílio de dois tensores de segunda ordem U_{ij} e T_{ij} definidos da forma que se descreve a seguir.

Para uma carga pontual aplicada num ponto qualquer (de coordenadas y) de um meio infinito, a solução num ponto x (de coordenadas x), é dada por:

$$u_i = U_{ij}(x, y) e_j$$

com e_j vector de base e a equação das condições na fronteira, escreve-se:

$$T_i = \sigma_{ij}\, n_j = T_{ij}(n) n_j$$

onde n_j representa o vector normal exterior n e σ_{ij} é dado pela expressão [76,83]:

$$\sigma_{ij} = \lambda u_{k,k}\delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i})$$

onde

δ_{ij} = símbolo de Kronecker e

$u_{k,k} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2}$

O tensor T_{ij}, cuja expressão se pode encontrar em [76], apresenta uma singularidade para $x = y$ e é função da distância $r(x,y)$ entre os pontos fronteira x e y e das suas derivadas.

4.3.3 Equações integrais de base

Entre outros Dubois e Lachat [84] apresentam um método para transformar o problema diferencial citado anteriormente numa equação integral que liga os deslocamentos e as tensões na superfície. A expressão final deduzida é:

$$\frac{1}{2}u_i(x) = \int_V U_{ij}(x,\xi) f_j(\xi) d\xi + \int_S U_{ij}(x,\xi) T_j(\xi) dS(\xi) - \int_S T_{ij}(x,\xi) u_j(\xi) dS(\xi) \quad (4.9)$$

onde x e ξ são pontos sobre S (Fig. 4.2).

A existência e a unicidade da solução ficam asseguradas sob certas condições:

- o domínio está em equilíbrio;
- não há deslocamentos de corpo rígido do conjunto.

A resolução da equação integral anterior permite-nos a obtenção das tensões f_j e dos deslocamento u_j desconhecidos sobre o contorno, enquanto que as relações seguintes nos dão as tensões e os deslocamentos em qualquer ponto x interior ao domínio, ou seja pertencente a V (Fig. 4.2):

$$\begin{aligned} u_i(x) &= \int_V U_{ij}(x,\xi) f_j(\xi) d\xi + \int_S U_{ij}(x,\xi) T_j(\xi) dS(\xi) - \\ &\quad - \int_S T_{ij}(x,\xi) u_j(\xi) dS(\xi) \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} \sigma_{ij}(x) &= \int_V D_{k_{ij}}(x,\xi) f_k(\xi) d\xi + \int_S D_{k_{ij}}(x,\xi) T_k(\xi) dS(\xi) - \\ &\quad - \int_S S_{k_{ij}}(x,\xi) u_k(\xi) dS(\xi) \end{aligned}$$

com $x \in V$ e $\xi \in S$ (Fig. 4.2) e em que $D_{k_{ij}}$, $S_{k_{ij}}$ são as componentes de tensores de terceira ordem cujas expressões podemos encontrar em [76], por exemplo.

4.3.4 Resolução numérica

Em geral, as soluções analíticas da equação integral (4.9) não existem e torna-se necessário recorrer a um tratamento numérico. Para isso discretiza-se a fronteira do domínio porque foi demonstrado [85] que se pode obter uma solução aproximada do problema, supondo as variáveis T_i e u_i regulares por troços.

Assim, a fronteira contínua é substituída por um conjunto de elementos (segmentos em domínios planos ou triângulos em domínios tridimensionais) e os integrais de (4.9) calculam-se sobre cada um desses elementos.

No que se segue suporemos que as forças volúmicas f_i são nulas.

Como consequência, a equação (4.9) pode transformar-se em:

$$\frac{u_i(P_n)}{2} = \sum_{m=1}^{M} T_j(Q_m)\Delta U_{ij}(Q_m, P_n) - \sum_{m=1}^{M} u_j(Q_m)\Delta T_{ij}(Q_m, P_n)$$

onde cada elemento é representado pelo seu centro de gravidade, P_n e Q_m, se se trata de um ponto fixo ou de uma variável de integração, respectivamente ΔU_{ij} e ΔT_{ij} são novos tensores, obtidos após integração dos tensores U_{ij} e T_{ij} sobre os elementos considerados. M é o número total de nós da fronteira.

A três dimensões, o número de equações a resolver é $3M$ porque cada nó tem três graus de liberdade e a cada um está associada uma equação. De forma semelhante, a duas dimensões, o número de equações a resolver é $2M$ porque cada nó tem dois graus de liberdade. Designando os dados por $\{y\}$, pode formular-se o problema da forma seguinte:

$$[A]\{x\} = [B]\{y\} \tag{4.10}$$

onde (4.10) é um sistema de equações lineares completo e não simétrico.

4.4 Aplicação ao estudo da mecânica da fractura linear.

O método dos elementos finitos é o que tem sido mais utilizado nas aplicações de métodos numéricos na resolução de problemas de mecânica da fractura linear. Um número elevado de técnicas tem sido sugerido para determinação do factor de intensidade de tensões, por exemplo, baseadas em resultados de elementos finitos, mas o problema comum a todos estes métodos é a adequada representação da singularidade da frente de fissura [86].

Estudos iniciais envolvendo a utilização de elementos finitos na mecânica da fractura [87,88], empregando elementos convencionais de tensão constante, mostraram que uma malha bastante fina é indispensável na proximidade da frente de fissura para que as tensões e os deslocamentos neste campo singular sejam representados de forma precisa. Para obtenção de uma solução numérica correcta dos problemas da mecânica da fractura tem vantagens o desenvolvimento de elementos especiais de frente de fissura que tenham em conta a singularidade $1/\sqrt{r}$ do campo de deslocamentos, próximo da frente de fissura. Muitas versões têm sido desenvolvidas até à data empregando quer formulações baseadas no método dos deslocamentos quer em métodos mistos.

Um dos primeiros trabalhos que introduziu a singularidade $1/\sqrt{r}$ num elemento finito foi desenvolvido por Tracey [89] que utilizou um simples campo de deslocamentos polinomial no interior de um elemento triangular. Este método foi posteriormente generalizado a uma família de elementos por Tracey e Cook [90]. Referindo-nos à figura 4.3 obtém-se uma singularidade de ordem r^{-P} (onde r é a distância radial ao nó 1) se o campo de deslocamentos no interior do elemento for interpolado através de:

$$u = (1 - \xi^P)\delta_1 + \xi^P(1 - \eta)\delta_2 + \xi^P\eta\delta_3$$

As coordenadas locais ξ e η definem-se de tal forma que $\xi = 1$ ao longo do lado 2 - 3 do elemento e $\xi = 0$ no nó 1. Aos lados radiais 1 - 2 e 1 - 3 corresponde $\eta = 0$ e 1, respectivamente. No entanto, os elementos obtidos por este método, não podem representar extensões constantes tal como as que surgem em problemas de tensões térmicas.

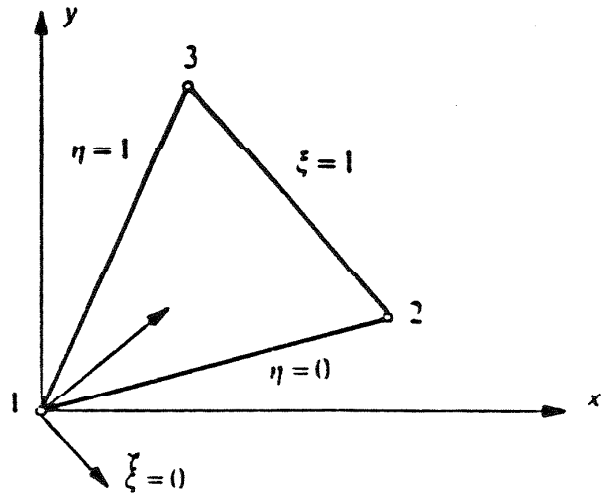


Fig. 4.3 - *Elemento triangular com singularidade no nó 1.*

Blackburn [91] também propôs um elemento triangular com um campo de extensões singular. Para um elemento de seis nós com um sistema de eixos semelhante ao definido na figura 4.3, a singularidade exigida é garantida pelo campo de deslocamentos seguinte:

$$u = b_1 + b_2\xi + b_3\eta + \frac{b_4\xi + b_5\eta + b_6\xi\eta}{\sqrt{\xi + \eta}}$$

onde as constantes b_i podem exprimir-se em função dos deslocamentos dos nós.

Akin [92] considera uma função de forma especial $(1 - N_1)^P$, onde N_1 é a função de forma para o nó 1, através da qual uma singularidade do tipo r^{-P} se pode introduzir em elementos triangulares ou quadrangulares. Para $p = \frac{1}{2}$ a função de forma obtida é idêntica à dada por Blackburn [91].

Benzley [93] introduziu termos suplementares no campo de deslocamentos de um elemento quadrangular para ter em conta a singularidade devida ao fundo de fissura.

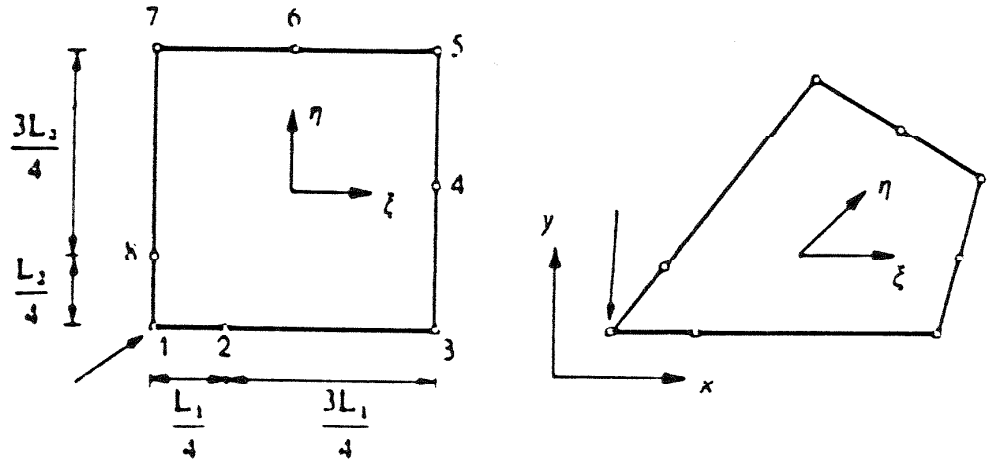


Fig. 4.4 - *Elementos quadrangulares isoparamétricos com nós médios deslocados.*

Considerando o elemento quadrangular isoparamétrico da figura 4.4, no qual os pontos nodais estão numerados localmente de 1 a 8. A singularidade pode introduzir-se no nó 1 alterando as posições dos pontos médios 2 e 8 para posições situadas a uma distância do nó 1 igual a uma quarta parte do comprimento de 1-3 e 1-7, respectivamente, como se mostra na figura 4.4. Considerando o lado 1-3, definido por $\eta = -1$ as funções de forma para os nós situados sobre este lado são as seguintes [86]:

$$N_1 = -\frac{1}{2}\xi(1 - \xi)$$

$$N_2 = (1 - \xi^2)$$

$$N_3 = \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)$$

Sendo assim temos:

$$x = \sum_{i=1}^{3} N_i x_i = -\frac{1}{2}\xi(1 - \xi)x_1 + (1 - \xi^2)x_2 + \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)x_3 \qquad (4.11)$$

Com uma expressão semelhante para a coordenada y. Situando a origem no nó 1 e designado o comprimento do lado 1-3 como L, temos $x_1 = 0$, $x_2 = L/4$ e $x_3 = L$. De (4.11) temos:

$$x = \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)L + (1 - \xi^2)\frac{L}{4} \qquad (4.12)$$

ou

$$\xi = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}} \qquad (4.13)$$

O termo $\frac{\partial x}{\partial \xi}$ da matriz jacobiana [86] tomando em conta (4.12) e (4.13), vem:

$$\frac{\partial x}{\partial \xi} = \frac{L}{2}(1 + \xi) = \sqrt{Lx}$$

Portanto, a matriz jacobiana tem uma singularidade no nó 1, onde $x = 0$. A variação do deslocamento ao longo de 1-3 é dada por:

$$u = \sum_{i=1}^{3} N_i u_i = -\frac{1}{2}\xi(1 - \xi)u_1 + (1 - \xi^2)u_2 + \frac{1}{2}\xi(1 + \xi)u_3$$

Substituindo ξ pela expressão dada por (4.13), obtemos:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{2}(-1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}})(2 - 2\sqrt{\frac{x}{L}})u_1 + 4(\sqrt{\frac{x}{L}} - \frac{x}{L})u_2 + \\ &\quad + \frac{1}{2}(-1 + 2\sqrt{\frac{x}{L}})(2\sqrt{\frac{x}{L}})u_3 \end{aligned}$$

A extensão na direcção do eixo dos xx é, então:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial x} = -\frac{1}{2}[\frac{3}{\sqrt{xL}} - \frac{4}{L}]u_1 + [\frac{2}{\sqrt{xL}} - \frac{4}{L}]u_2 + \\ &\quad + \frac{1}{2}[-\frac{1}{\sqrt{xL}} + \frac{4}{L}]u_3 \end{aligned}$$

A singularidade na extensão ao longo do lado 1-3 é, como se exigia, função de $1/\sqrt{r}$. A mesma variação da extensão radial obtém-se para o lado 1-7. No entanto, ao longo de linhas radiais interiores ao elemento e partindo do nó 1 a variação da extensão não é função de $1/\sqrt{r}$. Esta condição pode ser imposta transformando o elemento dado em triangular fazendo coincidir os nós 1, 7 e 8 (Fig. 4.5). Uma vez mais os nós médios são transferidos para os pontos situados a um quarto do

comprimento dos lados adjacentes ao nó que representa a frente de fissura que é considerado como sendo o nó 1. Pode mostrar-se que as coordenadas curvilíneas ξ e η se tornam, neste caso, directamente relacionáveis com as coordenadas polares r e θ, respectivamente. Ao longo do eixo $\eta = 0$, temos:

$$N_1 = N_3 = N_5 = N_7 = -\frac{1}{4}(1-\xi^2)$$

$$N_2 = N_6 = \frac{1}{2}(1-\xi^2) \tag{4.14}$$

$$N_4 = N_8 = \frac{1}{2}(1-\xi)$$

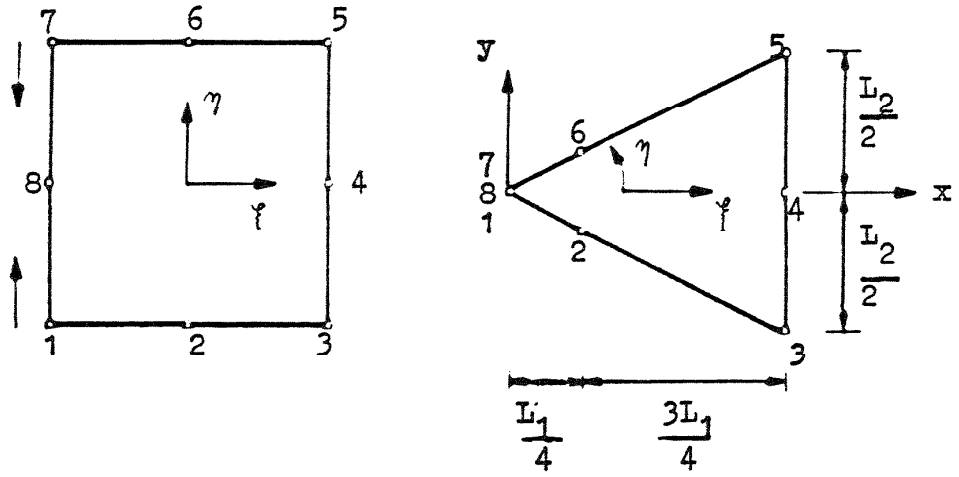


Fig. 4.5 - *Elemento triangular com nós médios deslocados*

Situando a origem no nó 1, como mostra a figura 4.5, temos:

$$x_1 = x_7 = x_8 = 0$$

$$x_2 = x_6 = L_1/4 \tag{4.15}$$

$$x_3 = x_4 = x_5 = L_1$$

considerando que:

$$x = \sum_{i=1}^{3} N_i\, x_i \tag{4.16}$$

Substituindo (4.14) e (4.15) em (4.16) obtemos:

$$x = \frac{L_1}{4}(1+\xi)^2$$

ou

$$\xi = -1 + 2\sqrt{\frac{x}{L_1}} \tag{4.17}$$

As equações (4.17) e (4.13) são idênticas e, portanto, o termo $\partial x/\partial \xi$ apresenta uma singularidade em $x = 0$, como anteriormente. A distribuição dos deslocamentos ao longo do eixo dos xx é dada por:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{4}(1-\xi^2)(u_1+u_3+u_5+u_7) + \frac{1}{2}(1-\xi^2)(u_2+u_6) + \\ &+\frac{1}{2}(1-\xi)(u_4+u_8) \end{aligned}$$

e a extensão correspondente vem:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial \xi}\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{L_1}(2u_1+u_3+u_5-2u_2-2u_6) - \\ &-\frac{1}{2\sqrt{L_1 x}}(3u_1+u_3+u_4+u_5-2u_2-2u_6) \end{aligned}$$

Note-se que $u_1 = u_7 = u_8$. Como se pode ver a extensão ε_x apresenta uma singularidade $1/\sqrt{r}$. Pode demonstrar-se que a extensão radial ε_r, ao longo de qualquer linha radial partindo do nó 1, possui a mesma singularidade $1/\sqrt{r}$. Isto é diferente do que acontece com o elemento quadrangular considerado anteriormente, no qual a singularidade $1/\sqrt{r}$ apenas se verifica ao longo dos lados do elemento.

A maior desvantagem que a utilização da técnica anterior contém, é o efeito da singularidade estar limitado aos elementos adjacentes da frente de fissura. Se a singularidade de frente de fissura for considerada como um campo adicional de tensão estendido ao de uma determinada zona e as funções de forma existentes forem utilizadas para modelizar este campo singular, então o efeito de frente de fissura pode estender-se para além dos elementos fronteiros.

Benzley [93] foi o primeiro a utilizar esta técnica. Utilizou elementos lineares e quadrangulares para modelizar a geometria da frente de fissura e introduziu a singularidade $1/\sqrt{r}$ por sobreposição, utilizando as funções de forma normais do elemento para este efeito. Se os elementos que contêm a função singular estão ligados a elementos normais, como se passa na fronteira da zona escolhida para influência da singularidade, os dois tipos de elementos não se deformam de forma análoga. Esta incompatibilidade pode corrigir-se especificando que a função deslocamento singular deve ter uma contribuição nula na fronteira da sua zona de influência o que se pode corrigir introduzindo uma função produto apropriada [94].

A vantagem mais interessante que este tipo de elemento introduz é que o factor de intensidade de tensão, k é considerado como incógnita da mesma forma que os

deslocamentos nodais. Por isso, os valores de k são obtidos directamente e sem que seja necessário recorrer a cálculos adicionais nem extrapolações.

Uma outra técnica consiste na utilização de elementos baseados em soluções analíticas. Nesta técnica tenta encontrar-se uma formulação para o elemento na qual o campo de fissura completo esteja representado e não só a singularidade de frente de fissura. Assim, pode utilizar-se um só elemento para representar a zona influenciada pela fissura em vez da malha refinada na frente de fissura. Se este tipo de elemento representar de forma completa a zona de influência da fissura é possível fixar a extensão desta no interior do elemento fronteiro. A propagação da fissura é possível apenas pela redefinição da posição da frente de fissura, evitando, assim, a construção de uma nova malha de elementos finitos.

Para o problema de uma fissura facial num sólido semi-infinito, pode encontrar-se uma solução analítica em forma de série para as tensões e os deslocamentos [95]. Se as mesmas soluções forem utilizadas numa formulação para um modo misto a natureza da solução na fronteira é afectada, mas é possível considerar que a solução se estenda até aos limites superior e inferior produzindo, assim, resultados aceitáveis. Formulações mistas foram, também, utilizadas por Roa, Raju e Krishna [96] e Apostal [97]. Pormenores sobre a formulação para elementos parabólicos isoparamétricos podem encontrar-se na referência [98].

A matriz de rigidez do elemento é obtida utilizando teoremas de energia normais, com os campos de tensões e deslocamentos expressos nos termos próprios dos Modos I e II que por sua vez se podem relacionar com os deslocamentos nodais. Desde que a solução analítica não inclua movimentos de corpo rígido podem introduzir-se três modos semelhantes. O integral de volume resultante na formulação da matriz de rigidez necessita da utilização de fórmulas especiais de quadratura de Gauss. Se este elemento estiver directamente ligado a um elemento parabólico isoparamétrico normal, as condições de equilíbrio não são respeitadas nos nós e torna-se necessário o uso de elementos de junta. As funções de forma relativas a estes elementos podem encontrar-se na referência [99].

A técnica da sobreposição é um processo utilizado para resolver problemas com singularidades. Esta técnica utiliza uma combinação linear da solução clássica para um campo singular e uma análise não-singular por elementos finitos. A ideia geral é a de escolher uma solução singular que seja análoga à solução exigida pelo problema; neste caso a solução para uma fissura numa laje infinita é considerada como representando uma fissura numa laje finita. Esta solução analítica não satisfará, obviamente, as condições fronteira existentes no limite da região finita. Estas discrepâncias na fronteira podem calcular-se através dos valores correctos, dados pelo sistema de elementos finitos não singular e depois aplicadas como forças nodais com sentido contrário na solução analítica para se obter o resultado final. Morley

[100], Yamamoto, Tokudo e Sumi [101] e Rao, Raju e Krishna [96] utilizaram várias adaptações desta técnica e obtiveram bons resultados.

Embora os elementos analíticos apresentados anteriormente satisfaçam as condições internas de equilíbrio e compatibilidade, a necessária continuidade do deslocamento na fronteira não é respeitada. Por este motivo, a convergência nestes elementos não pode assegurar-se, embora elementos diferentes dos normais sejam, agora, largamente utilizados mas parece que conduzem aos mesmos resultados que os elementos normais em casos específicos.

As incertezas relativas à não-convergência podem afastar-se dos elementos analíticos através da imposição da conformidade dos deslocamentos na fronteira utilizando a técnica híbrida. Estas limitações na fronteira obtêm-se especificando que os deslocamentos no elemento finito da fronteira são iguais aos dados pela solução analítica nos mesmos pontos. Esta condição pode incluir-se na formulação da função energética utilizando um multiplicador de Lagrange.

Elementos híbridos foram largamente desenvolvidos e utilizados por Pian [102], Tong [103] e Irons [104] e mostraram que conduzem a resultados satisfatórios. Pian [105] propôs a utilização do princípio variacional de Hellinger - Reissner [75,106] como um funcional para a formulação de elementos em modo misto. Pian, Tong e Luk [107] desenvolveram uma solução fundamental satisfazendo simultâneamente o equilíbrio e a compatibilidade internos o que produz, em certas circunstâncias, um processo de integração mais simples porque dá origem a um integral de superfície. Esta última formulação reduz a aplicação de tracções superficiais a uma determinada fórmula na fronteira porque para o caso especial de um elemento de fissura as tracções são nulas sobre as faces da fissura e não é requerido que se adaptem nos elementos de transição da fronteira. Se a fórmula da tracção superficial é incluída, as equações integrais de fronteira a que se chega são idênticas às obtidas por Brebbia [108] utilizando o método dos resíduos pesados para formular a técnica dos elementos fronteira. Brebbia [108] considera um ponto num domínio infinito para a solução fundamental e aplica esta à fronteira, assim obtém uma solução integral na fronteira para deslocamentos e tensões superficiais. Pian [107] considera a solução por séries infinitas para uma face da fissura numa placa infinita, para a sua solução fundamental e despreza os valores da tracção superficial dados.

Os dois métodos dão origem a um conjunto geral de equações semelhante que na forma matricial dá uma matriz completa, não-simétrica e não-positiva definida. Para a formulação de Brebbia conhecem-se os valores na fronteira quer das tensões quer dos deslocamentos, de igual forma, as incógnitas são tensões e deslocamentos. Na formulação de Pian temos como dado apenas a forma da deformada da fronteira e como incógnita os coeficientes da solução fundamental.

As duas técnicas diferem neste aspecto, enquanto Pian impõe a simetria tomando

a média do somatório da matriz não-simétrica com a sua transposta e depois resolve o sistema de equações com a "matriz rigidez" resultante em conjugação com elementos finitos normais. Deve notar-se que embora a "matriz de ridídez" seja simétrica não é necessáriamente positiva e, assim, podem surgir problemas quando se utilizam rotinas próprias para resolução de sistemas de elementos finitos normais. Brebbia resolve o sistema de equações com a sua matriz não-simétrica utilizando pivôs parciais o que reduz os problemas anteriormente referidos.

Capítulo 5

Aplicação da mecânica da fractura ao betão

5.1 Generalidades

O betão é constituído por uma pasta que serve de ligante (água + cimento), por inertes (areia + brita ou godo) e por vazios (poros e fissuras de retracção). Podemos ter ainda outros constituintes que são designados por aditivos. Estes adicionam-se à massa do betão com o objectivo de lhe conferir determinadas propriedades tais como: plasticidade, retardação ou aceleração da presa, diminuição do calor de hidratação e impermeabilidade. Portanto, estamos em presença de um material compósito de matriz porosa. Devido em parte à sua heterogeneidade o betão apresenta um certo grau de anisotropia. Por exemplo, podemos referir a diferença considerável que se pode encontrar entre o módulo de elasticidade da matriz e o dos inertes. Por todos estes motivos o betão não apresenta um processo dominante de rotura.

A aplicação da mecânica da fractura ao betão tem-se efectuado de forma cautelosa e pode dizer-se que o sucesso é ainda modesto. Isto, tem origem nas dificuldades surgidas quando se transpõem os conceitos válidos em sólidos elásticos lineares para sólidos visco-elásticos e plásticos.

Neville [109] é apontado [110] como sendo o primeiro a aplicar a teoria de Griffith ao betão. Ele sugeriu que as causas da influência do tamanho dos provetes sobre a resistência do betão poderiam estar relacionadas com a distribuição aleatória da fissuração apontada por Griffith. No entanto, o primeiro estudo experimental sobre a aplicabilidade da mecânica da fractura ao betão foi conduzido por Kaplan [111] em 1961.

Outros estudos se seguiram e nos nossos dias o prosseguimento da investigação neste domínio é considerado como a primeira prioridade [112,113] porque pode contribuir para encontrar betões com mais elevada resistência à fissuração. As fissuras podem resultar de acções mecânicas (choques, cargas) ou de retracções,

variações de volume de origem física, química ou físico-química. No caso do betão hidraúlico as causas não mecânicas são numerosas e muito importantes na prática.

As fissuras presentes na massa do betão são designadas por microfissuras [1]. A propagação destas microfissuras originadas por defeitos na presa e cura do betão, conduz à rotura do material. Se a propagação não é total temos o que se designa por fissuração. A resistência à fissuração está ligada a outras propriedades importantes do betão como: resistência à tracção, resistência ao desgaste, resistência ao choque, velocidade de endurecimento e estabilidade de volume.

Retomando a classificação de Freudenthal [114], há dois tipos fundamentais de propriedades mecânicas características do comportamento de um material heterogéneo:

- as propriedades sensíveis à microestrutura que dependem da contribuição selectiva de um pequeno grupo de elementos (por exemplo: a resistência);
- as propriedades insensíveis à microestrutura que resultam da contribuição conjunta de todos os elementos (por exemplo: a rigidez).

Esta distinção pode ser ilustrada [115], por exemplo, por uma cadeia cuja resistência é a do elo mais fraco, enquanto que a deformação é igual à soma das deformações de cada elo.

Os mecanismos de fissuração e de rotura do betão são do primeiro tipo. Portanto o seu estudo necessita da tomada em consideração da microestrutura e das heterogeneidades. Estes mecanismos, como se verá adiante, são característicos do betão, daí a falta de sentido em se fazerem analogias com, por exemplo, a plasticidade dos metais.

As microfissuras, cujas dimensões são da ordem de grandeza das dos inertes, existem permanentemente no betão, mesmo antes que este seja submetido a acções exteriores. Estas microfissuras devem-se à segregação durante a betonagem, à retracção local da matriz rompendo a ligação com os inertes e às variações de temperatura. A juntar a estas causas temos, ainda, situações em que as condições de apoio impedem a retracção do betão.

A existência de microfissuras no betão foi comprovada através de numerosos trabalhos como por exemplo os de Slate e Olsefski [116] que, examinando com raios X pedaços de diferentes secções de um provete não solicitado, verificaram a existência de fissuras estando a maior parte delas localizadas na ligação inerte-matriz.

As microfissuras facilitam o surgimento de fissuras macroscópicas no betão quando este é solicitado. Com efeito, as inclusões e os vazios introduzidos na matriz

[1] fissuras à escala dos grãos, as dimensões destes estão compreendidas entre 0,025 mm (grão de cimento não hidratado) e 25 mm (brita) ou mais.

constituem, para o material, defeitos que sob carga, serão os locais priveligiados de concentrações de tensões desenvolvendo uma fissuração que pode levar à rotura do material.

5.2 Mecanismos de fissuração do betão

O processo de fissuração da pasta de cimento e do betão sob uma dada acção é hoje claramente compreendido [110]. Tanto a pasta de cimento como o betão podem considerar-se como materiais com duas fases, constituídas por partículas rígidas dispersas numa matriz fraca. No caso da pasta de cimento, grãos de cimento não hidratados estão dispersos nos grãos de cimento hidratados (C-S-H); para o betão, partículas de inertes estão dispersas na pasta de cimento. A curva tensão-extensão $(\sigma - \varepsilon)$ de um inerte em compressão (Fig. 5.1) é essencialmente linear até ao ponto

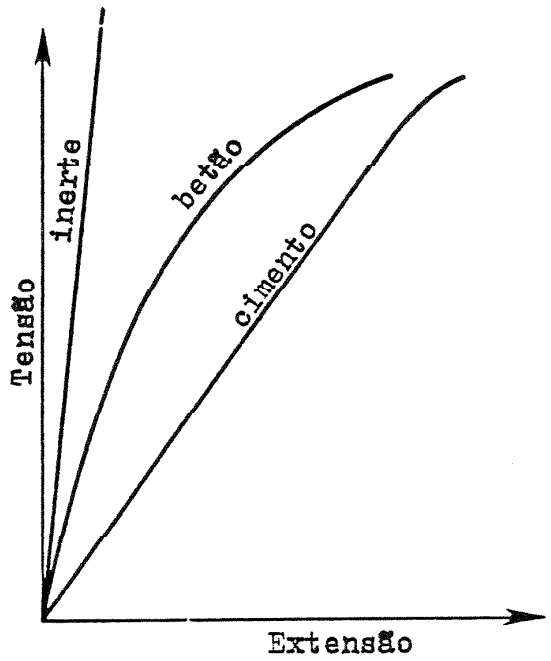


Fig. 5.1 - *Curvas tensão-extensão em compressão de um inerte, do cimento e do betão.*

da rotura. A curva $\sigma - \varepsilon$ da pasta de cimento é também, essencialmente linear até 90-95% da sua carga última. No entanto, a curva $\sigma - \varepsilon$ do betão é nitidamente não linear. Esta não linearidade deve-se, em parte, à heterogeneidade do betão e à imperfeita ligação entre os inertes e a pasta de cimento. Para além disto um

considerável número de novas fissuras começa a sua propagação à medida que a carga aumenta [117]. A natureza quase linear da curva $\sigma - \varepsilon$ da pasta de cimento deve-se à melhor ligação entre os grãos de cimento não hidratados e os $C - S - H$.

A curva $\sigma - \varepsilon$ do betão em compressão pode dividir-se em 4 zonas (Fig. 5.2) [118]. Até cerca de 30% da carga última e a uma velocidade de aplicação da carga normal, verifica-se uma pequena propagação das fissuras pré-existentes e a curva $\sigma - \varepsilon$ é essencialmente linear. A partir deste ponto, a curva $\sigma - \varepsilon$ torna-se significativamente não linear porque as fissuras interfaciais começam a propagar-se sob carga. Este comportamento deve-se em parte à diferença das constantes elásticas entre os inertes e a pasta de cimento e, também, às elevadas concentrações de tensões que ocorrem nestas regiões [119,120]. A $0,5\ \sigma_{ult}$, a adicionar ao maior desenvolvimento das fissuras interfaciais, começa a verificar-se a propagação de fissuras através da pasta de cimento, no prolongamento das iniciadas nos inertes e aproximadamente paralelas ao eixo de solicitação, mas ainda numa fase estável. Finalmente, a cerca de $0,75\ \sigma_{ult}$, as fissuras da matriz começam a propagar-se com mais velocidade,

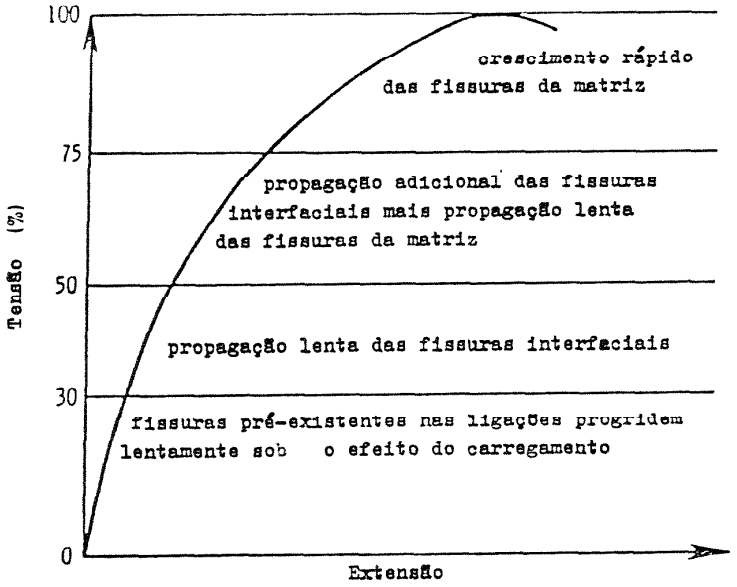


Fig. 5.2 - *Curva tensão-extensão do betão mostrando as diferentes zonas de propagação de fissuras.*

embora o sistema continue com resistência suficiente para que se produza uma propagação estável sob certas velocidades de solicitação. As fissuras podem tornar-se tão grandes que a rotura ocorra. Entre 75 e 90% da carga de rotura, se se mantiver a carga constante (fadiga elástica), a rotura do provete pode acontecer.

Em tracção directa, os resultados variam muito com a proporção e a dimensão dos inertes. Para Kaplan [121] as fissuras no betão em tracção aparecem para extensões entre 30 e 80 $\times 10^{-6}$; para Evan e Marathe [122] as fissuras iniciam a sua propagação entre 90 e 140 $\times 10^{-6}$ de extensão o que corresponde a 68 e 89% da carga máxima.

M. Tensen e J. Bergues [123] estudaram o comportamento do betão utilizando um modelo simples de um poro esférico ou de uma inclusão esférica num meio infinito submetido a tensões triaxiais (Fig. 5.3). Eles mostraram que quando a carga é suficientemente elevada, os poros podem abater o que é semelhante à passagem à fieira dos metais.

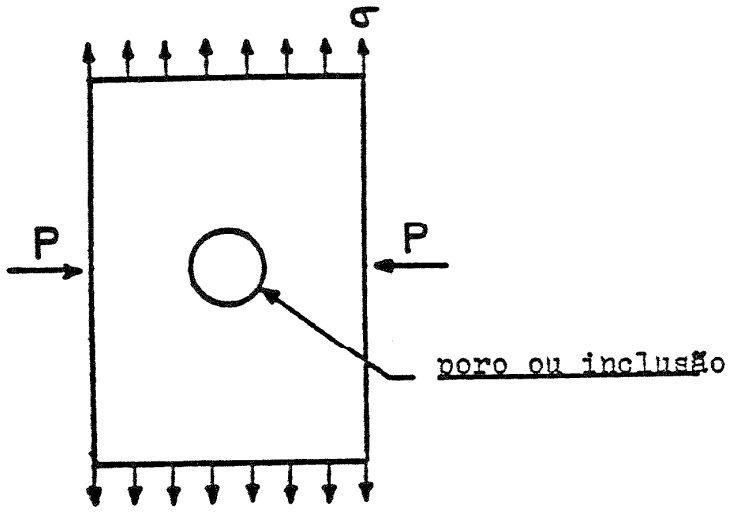


Fig. 5.3 - *Modelo simples para estudo do betão*

Wittmann e Zaitsev [124] proposeram dois programas de cálculo dos mecanismos de fissuração, um para a pasta de cimento endurecida e outro para o betão. Nos seus cálculos distinguiram três tenacidades: a da interface pasta de cimento-inertes, a da pasta de cimento e a dos inertes. A distribuição aleatória dos vazios na pasta de cimento, bem como a dos inertes foi considerada com a ajuda de funções densidade de probabilidade. No caso da pasta de cimento endurecida, estudaram primeiro o que se passava com um poro numa matriz infinita antes de passar à estrutura real (Figs. 5.4 e 5.5).

Para o betão, Wittmann e Zaitsev [124] consideraram as três etapas seguintes:

1. propagação ao longo da interface;
2. propagação na matriz;
3. encontro de outra inclusão (Fig. 5.6).

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados dos seus cálculos para uma estrutura real onde k_{IC}(inertes) $\gg$ k_{IC}(matriz) (Fig. 5.7) e no caso de k_{IC}(inertes) $\simeq$ k_{IC}(matriz) (Fig. 5.8). A grande tenacidade dos inertes origina a paragem e o desvio das fissuras. Em consequência, os materiais compósitos em que os inertes têm uma tenacidade alta, têm um comportamento aparentemente mais dúctil que o da pasta de cimento isolada.

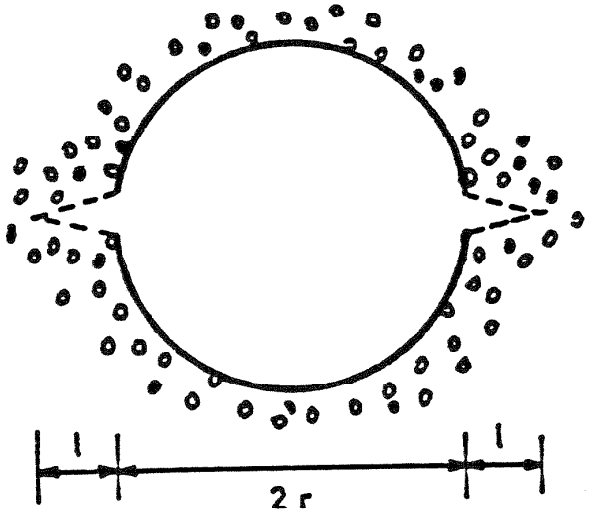


Fig. 5.4 - *Representação esquemática de um poro cilíndrico com entalhes num material poroso.*

Como conclusão destes trabalhos, pode dizer-se que a rotura do betão não pode ser correctamente caracterizada por um só parâmetro.

5.3 Condições de aplicação da mecânica da fractura linear ao betão

Para aplicar os conceitos da mecânica da fractura linear a materiais como o betão é necessário verificar as duas condições seguintes [125,126]:

- a zona não elástica que precede a fissura deve ser muito pequena quando comparada com o domínio elástico que a envolve;
- as dimensões da zona não elástica devem manter-se estacionárias ao longo do ensaio.

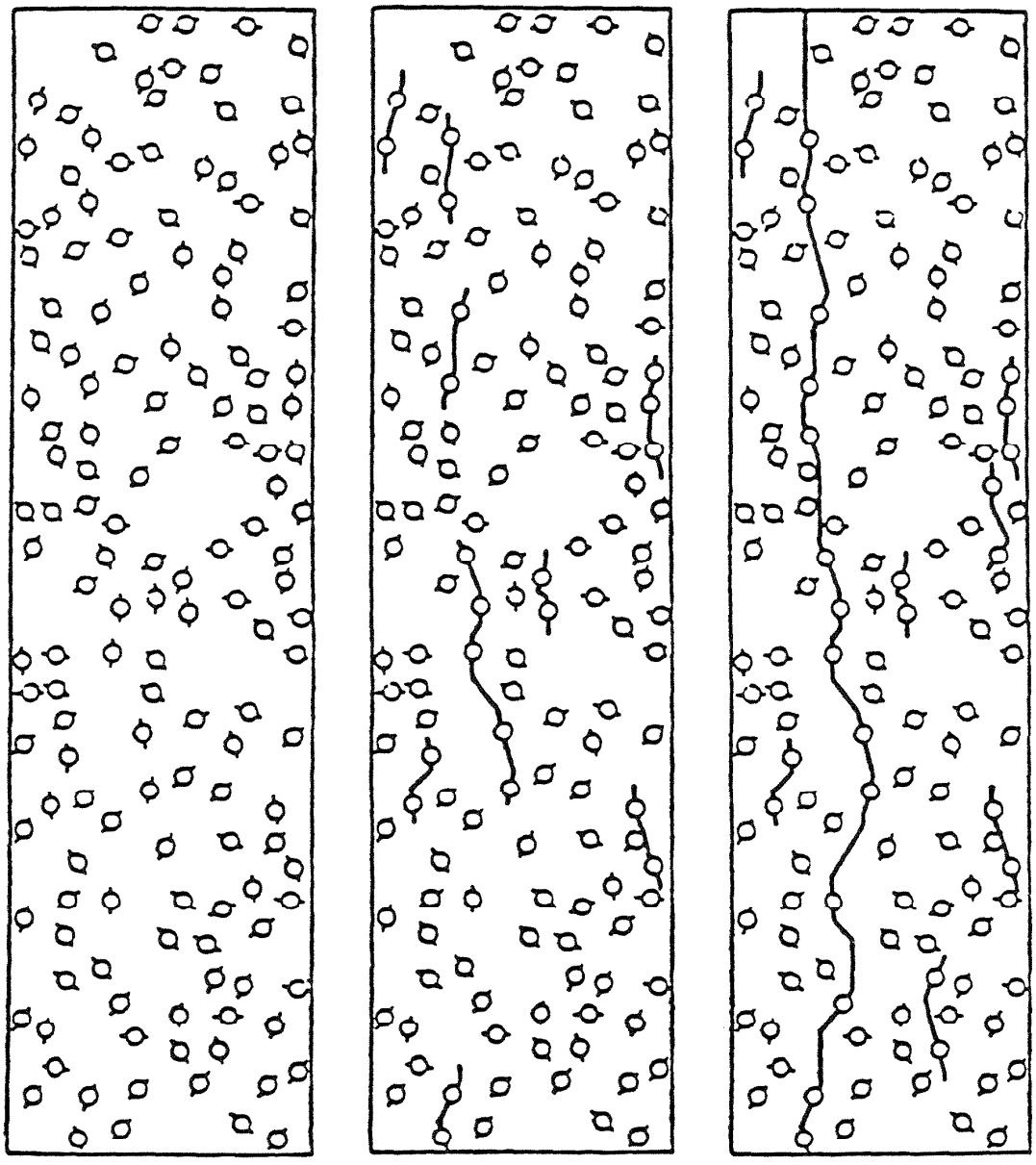


Fig. 5.5 - *Resultado de um calculo bidimensional.*
A carga cresce da esquerda para a direita.

No betão tradicional, a zona não elástica é caracterizada por diversos mecanismos dissipativos ligados a fenómenos físicos diferentes:

- aparição e desenvolvimento da microfissuração que conduz à macrofissuração;
- difusão da água nos poros do betão acompanhada de mudanças de fase água-vapor de água.

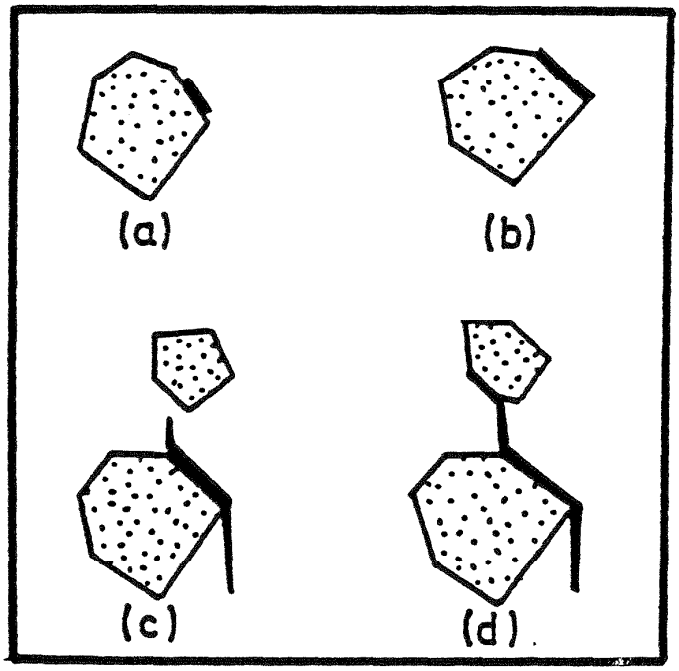


Fig. 5.6 - *Representação esquemática de uma fissura na interface atravessando a matriz antes de encontrar uma nova inclusão.*

Estes fenómenos produzem-se numa zona de uma dezena de centímetros, sensivelmente, para além da frente da macrofissura, o que é muito mais que a dimensão das zonas plásticas observadas nos metais.

Em consequência se se quiser que esta zona seja considerada como restrita, é evidente, que as dimensões do domínio elástico circundante devem ser relativamente grandes. Por outro lado, para se obter uma constância das dimensões da zona não elástica, é necessário que o comprimento da fissura seja significativo (cerca de 5 vezes o comprimento da zona não elástica).

Como já foi referido, as primeiras aplicações da mecânica linear ao betão foram efectuadas por Kaplan [111] em 1961. Para calcular a taxa crítica de libertação da energia de deformação G_C, Kaplan fez variar três parâmetros nas suas experiências: três composições de betão, dois tipos de solicitação em flexão e três comprimentos de entalhe diferentes para cada tipo de provete. O cálculo de G_C é efectuado por dois métodos diferentes: pelo método das complacências e pelo da consideração da

singularidade elástica na frente do entalhe (cálculo de K_I). O autor verificou que os provetes com comprimentos de entalhe diferentes, deram sensívelmente o mesmo valor de G_C com uma dispersão de 5%; G_C determinado em flexão 4 pontos é 15%

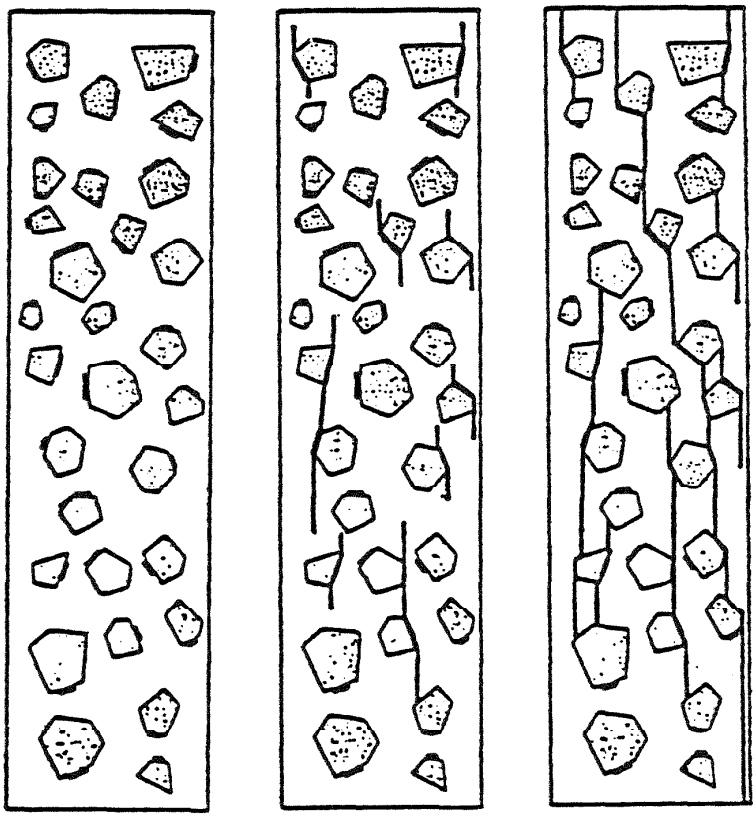


Fig. 5.7 - *Formação de fissuras segundo um cálculo em que k_{IC}(inertes)$\gg$ k_{IC}(matriz).*

inferior ao G_C determinado pela flexão 3 pontos, G_C para os provetes de pequenas dimensões é inferior cerca de 3% ao dos provetes de grandes dimensões, os dois métodos de cálculo dão um valor diferente da ordem dos 21%. Para finalizar, Kaplan [111] assinala e existência de uma ramificação de microfissuras na proximidade da frente de entalhe antes da propagação brutal provocar a rotura do provete.

Outros trabalhos se seguiram sobre a fissuração do betão. Lott e Kesler [127] propuseram um modelo de rotura do betão $K_C = K_{PC} + f(ARR)$), onde K_{PC} é o factor de intensidade crítica da pasta de cimento endurecida fazendo parte do betão e $f(ARR)$ é uma função que representa a energia suplementar a adicionar devido à presença dos inertes. Para estudar a influência da razão (a/c) água/cimento, das dimensões e da quantidade de materiais inertes sobre a resistência à fissuração, Lott

e Kesler [127] ensaiaram provetes $10 \times 10 \times 30\ cm^3$ com entalhe, de argamassa e

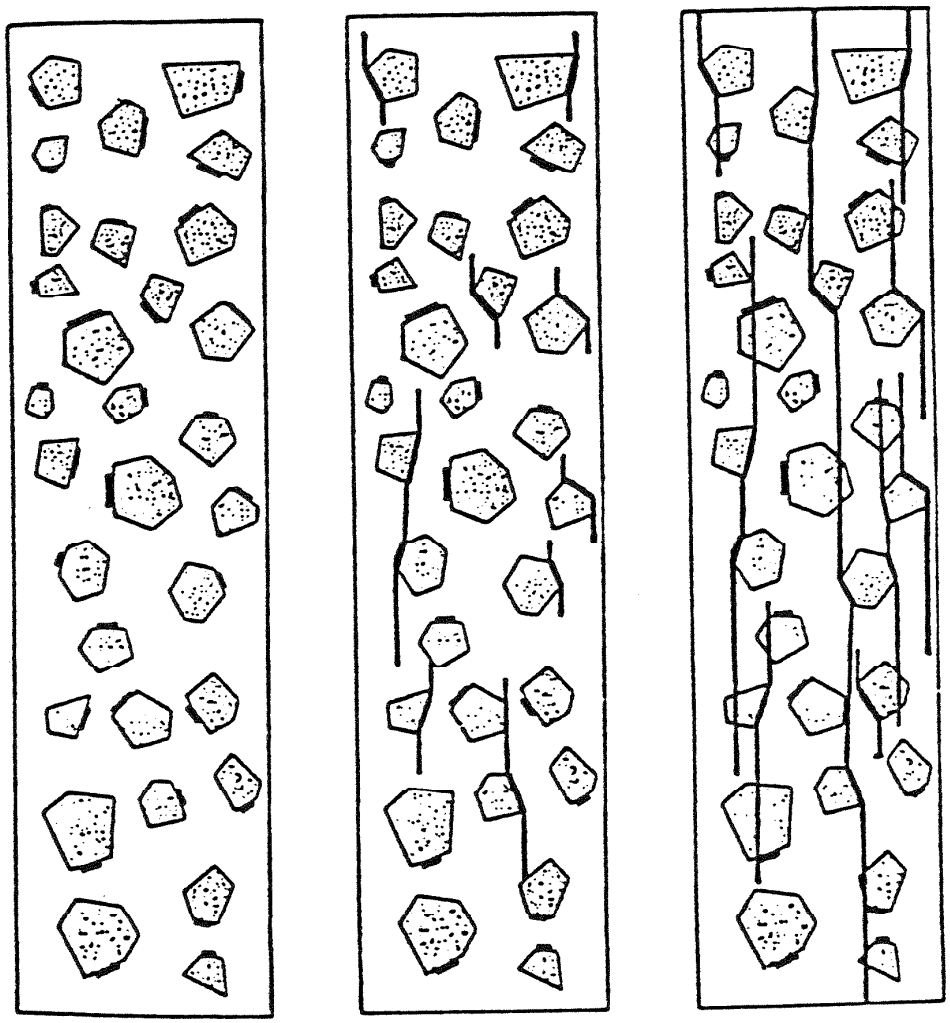


Fig. 5.8 - *Formação de fissuras segundo um cálculo em que k_{IC} (inertes)$\simeq$ k_{IC} (matriz).*

de betão, com diferentes proporções a/c (água/cimento), ar/c (areia/cimento) e g/c (inertes grossos/cimento). Os resultados obtidos mostram que a tenacidade do betão (com 30 a 40% de inertes grossos) é cerca de 20% mais elevada que a da argamassa com as mesmas razões a/c e ar/c. Por outro lado, as tenacidades K_C, da argamassa e do betão não se alteram se se modificar a razão a/c.

Em 1969, Naus e Lott [128] efectuaram vários ensaios sobre a rotura de provetes em flexão 4 pontos em pasta de cimento e em argamassa ($5,1 \times 5,1 \times 35,6\ cm^3$) e em

betão ($10,2 \times 10,2 \times 30,5\ cm^3$) para estudar a influência da razão a/c, da presença de um introdutor de ar, da idade do provete, da quantidade de inertes finos (areias) e da natureza e quantidade de inertes grossos. Os resultados mostram que o factor crítico de intensidade de tensão diminui quando a razão a/c cresce para a pasta de cimento endurecida e para a argamassa, mas mantém-se constante no betão; o factor crítico de intensidade de tensão da pasta de cimento, da argamassa e do betão cresce com a idade do provete e com o volume de aditivo introdutor de ar. Para a argamassa, o aumento da razão ar/c aumenta K_C, para o betão este aumento diminui K_C. O crescimento da dimensão dos grãos ou da sua quantidade aumenta a tenacidade do betão. O factor crítico de intensidade de tensão do betão fabricado com inertes britados é superior ao do betão fabricado com inertes rolados. Finalmente, não há uma diferença significativa entre os factores críticos de intensidade de tensão dos betões com idades de 28 e de 90 dias.

Num estudo teórico sobre a mecânica da fractura aplicada ao betão hidráulico, Glucklich [129] demonstrou que a energia de fissuração é principalmente convertida em energia de superfície e que a área desta superfície é maior que a área da superfície de fissura efectiva; o carácter heterogéneo do betão permite a paragem da fissura após uma dada propagação e impede a rotura total. Glucklich [124] sugere que G_C é uma propriedade fundamental do material permitindo determinar a resistência do betão a diferentes solicitações.

Moavenzadeh e Kuguel [130] utilizaram diferentes métodos para calcular a energia específica de rotura γ (medindo a área sob a curva carga-deformação), a taxa crítica de libertação da energia de deformação G_C (utilizando a fórmula de G empregada por Kaplan [111] e o factor crítico de intensidade de tensão K_C (utilizando a fórmula empregada por Lott e Kesler [127] de uma pasta de cimento endurecida, de uma argamassa e de um betão através de ensaios de flexão três pontos ($2,5 \times 2,5 \times 30\ cm^3$). Eles concluiram que a energia específica de rotura γ do betão se pode avaliar a partir da área da curva carga-deformação obtida num ensaio de propagação estável de fissura. Mostraram, ainda, que tendo em consideração as microfissuras e as fissuras à volta da fissura principal, a superfície de rotura pode ser 20 vezes superior à secção nominal do provete em flexão.

Shah e McGarry [131] efectuaram ensaios sobre duas séries de provetes. a primeira constituída por provetes $5 \times 5 \times 56\ cm^3$ em pasta de cimento, argamassa e betão, com um comprimento de entalhe variando de 0,63 a 2,54 cm e ensaiados em flexão três pontos. A segunda série constituída por provetes $30 \times 7,5 \times 1,25\ cm^3$ e $30 \times 7,5 \times 2,5\ cm^3$ ensaiados por tracção directa com fissura central e fissuras de bordo simétricas. Eles verificaram que a resistência à tracção da pasta de cimento é muito sensível à presença do entalhe. Por outro lado, a resistência à tracção do

betão e da argamassa é independente da existência do entalhe. Segundo Shah e McGarry [131] o betão tem uma rotura progressiva e estável devido às microfissuras e às ramificações de fissuras. Na contribuição para a discussão deste artigo, Brown, Hudson e Marathe [132] mostram que a rigidez da máquina de ensaio tem um papel importante para realizar a rotura controlada do provete e para a obtenção de uma curva carga-deformação conveniente ao estudo do material.

Hillemeier e Hilsdorf [133] utilizaram provetes préfissurados do tipo "compact-tension" (C.T.) recomendados na norma ASTM E399-83 [46] (Fig. 5.9) para estudar a resistência à fissuração da pasta de cimento, da pasta de cimento misturada com areias quartzosas, com partículas em suspensão e com introdutor de ar. Os ensaios efectuaram-se com deformação imposta através da entrada forçada de uma cunha. Os resultados mostram que a pasta de cimento é um material sensível à presença do entalhe (a tensão de tracção na frente de entalhe varia com o comprimento deste), que o factor crítico de intensidade de tensão k_{IC} diminui após uma dada propagação da fissura (resultado contrário ao de Brown [134], segundo o qual K_{IC} é independente da propagação da fissura), e depois mantém-se constante até à rotura completa do provete. Este valor constante de K_{IC} idêntico para todos os provetes de comprimento inicial diferente é designado como o verdadeiro valor da resistência à fissuração da pasta de cimento. A presença de partículas em suspensão na pasta de cimento diminui K_{IC}, enquanto que a presença de areias aumenta K_{IC}.

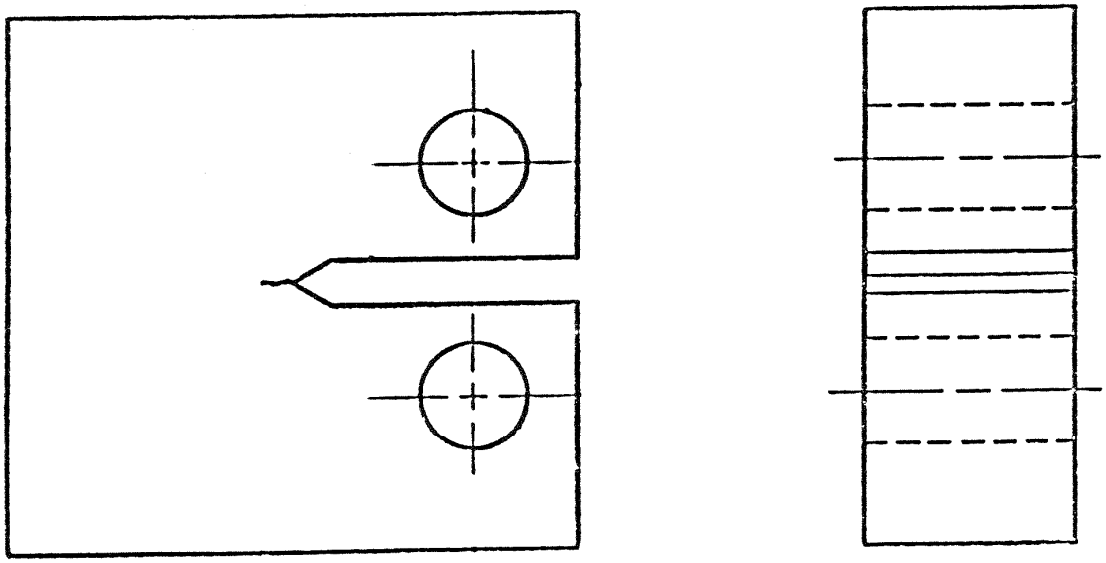


Fig. 5.9 - *Provete do tipo "compact-tension" (C.T.).*

Com o objectivo de encontrar um processo experimental válido para determinar a resistência à fissuração de uma pasta de cimento e de uma argamassa, Brown e

Pomeroy [134,135] utilizam o provete tipo D.C.B. (largura = 5 cm, altura = 10 cm e comprimento = 35 cm). Utilizaram, também, provetes prismáticos com entalhe ($3,8 \times 3,8 \times 25\ cm^3$) em flexão 4 pontos. Realizando ciclos de carga e descarga para cada comprimento de fissura, verificaram que as curvas carga-deformação da pasta de cimento e da argamassa apresentam fases de histeresis e de deformações residuais. Os resultados mostram que nos dois tipos de provetes ensaiados os valores de K_{IC} são os mesmos e que o factor crítico de intensidade de tensão, K_{IC}, da argamassa aumenta quando a fissura se propaga. Para a pasta de cimento, K_{IC} é independente da propagação da fissura. Com o provete tipo D.C.B., pode estudar-se uma propagação de fissura mais longa, variando entre 10 a 100 mm (a propagação de fissura não se pode realizar senão sobre cerca de 10 mm nos provetes em flexão 4 pontos).

Kesler, Naus e Lott [136] propuseram um modelo para estimar quantitativamente o comprimento da zona de microfissuração na proximidade da frente de entalhe. Os ensaios que realizaram sobre argamassa e betão mostraram, com a ajuda de extensómetros eléctricos, a existência de uma zona perturbada, não elástica, até cerca de 10 cm da frente de entalhe no momento da propagação da fissura. Os provetes utilizados tinham a forma de uma placa em tracção concentrada de $5,08\ cm$ de espessura, $30,48\ cm$ de altura (dimensão paralela à força de tracção) e de largura variando de $45,72$ a $91,44\ cm$ (dimensão paralela à direcção do plano do entalhe) (Fig. 5.10). De notar que neste estudo o factor crítico de intensidade de tensão, K_{IC}, da argamassa e do betão diminui quando o comprimento do entalhe aumenta. Como conclusão deste estudo Kesler e seus colaboradores [136] afirmam que a geometria do provete e o modo de solicitação podem influenciar os resultados para a pasta de cimento, a argamassa e o betão.

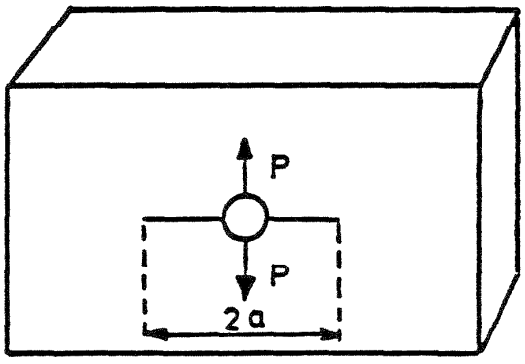


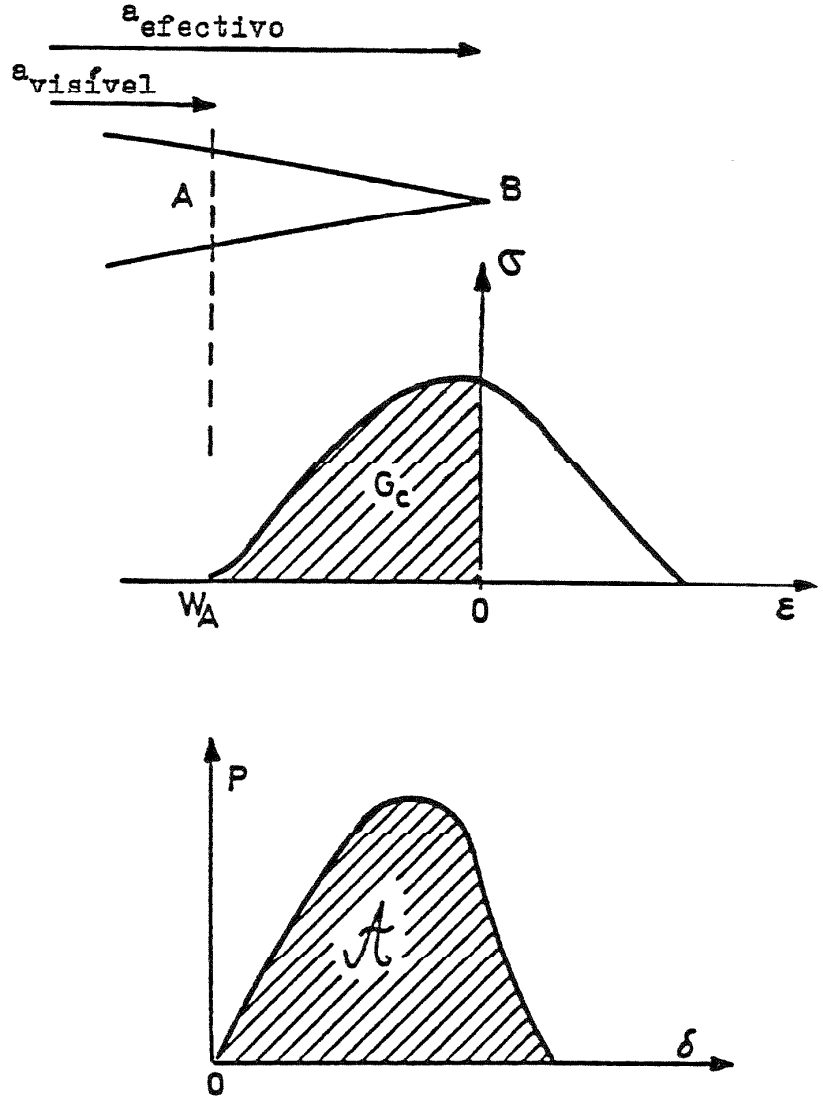
Fig. 5.10 - *Tracção concentrada*

Romualdi e Balson [137] aplicaram a mecânica da fractura ao betão de fibras e mostraram que para uma dada percentagem de fibras, a resistência à tracção do betão é inversamente proporcional ao quadrado do espaçamento das fibras. Este fenómeno deve-se à paragem da propagação da fissura pelas fibras. O mesmo resultado foi obtido em flexão [138]. Romualdi e Mandel [139] mostraram que a resistência à fissuração é inversamente proporcional à distância entre as fibras. Shah e Rangan [140] realizaram ensaios sobre provetes em betão de fibras de aço ($0,254 \times 0,254 \times 19\ mm^3$) em flexão com dimensões $5 \times 5 \times 25\ cm^3$ e em tracção directa com dimensões $5 \times 2,5 \times 30\ cm^3$. A percentagem de fibras variava entre 0,25 e 1,25%. Eles mostraram que com uma percentagem de fibras de 1,25%, a energia de fissuração é 20 vezes mais elevada que a do testemunho, enquanto que a resistência à tracção por flexão era apenas 2 vezes superior. O entrelaçamento das fibras (relação entre o comprimento e o diâmetro das fibras), a orientação das fibras no betão (ao acaso, paralelas ou perpendiculares à direcção da força de tracção) e o volume das fibras têm uma influência considerável sobre a resistência à fissuração do betão e da argamassa. No entanto, contrariamente a Romualdi e Al [137] eles verificaram que o espaçamento das fibras tem uma influência muito baixa sobre a resistência à tracção do betão. Para uma diminuição da distância entre as fibras de $2,08$ para $0,338\ cm$, a resistência à tracção aumenta menos de 10% para a argamassa e menos de 5% para o betão. Eles concluem que o espaçamento entre as fibras só pode influenciar a resistência à fissuração se for superior a um certo comprimento crítico.

Welch e Haisman [141], calcularam G_C e K_C segundo métodos diferentes. Tomando a_0, comprimento de entalhe inicial, como comprimento da fissura no momento da rotura do provete e considerando num primeiro caso o módulo E medido pelo método dinâmico e num segundo caso o módulo E medido como a inclinação da recta que passa pela origem da curva carga-deformação e pelo ponto correspondente a 70% da carga de rotura, G_C varia de $10,5$ a $17,5\ N/m$. Substituindo nos cálculos o comprimento do entalhe, a_0, pelo comprimento de fissura, a_c, deduzido da curva de complacência, G_C varia de $22,4$ a $37,5\ N/m$. O factor crítico de intensidade de tensão K_C (parâmetro independente de E) varia de $0,65$ a $0,94\ MPa\sqrt{m}$ para comprimentos de fissura, respectivamente, a_0 e a_c. Eles concluiram que não há dúvida sobre a possibilidade de aplicação dos conceitos da mecânica da fractura linear ao estudo da propagação de fissuras e dos mecanismos de rotura do betão. No entanto, as dificuldades estão na escolha dos métodos de cálculo de G_C ou de K_C, assim como nas hipóteses feitas para determinar a tensão na proximidade da frente de fissura.

Outros investigadores tentaram tomar em conta as ramificações na proximidade da frente de fissura. Carpinteri [142] definiu um módulo E^* que tem em conta a

microfissuração do betão, utilizando pequenos provetes em flexão três pontos. Para isso, calculou separadamente K_{IC} (utilizando uma simples fórmula decorrente do método das complacências) e o integral crítico J_{IC} (avaliado pela área A, sob a curva carga-deslocamento no momento da rotura, $J_{IC}\ Bda = -dA$, onde Bda é a superfície fissurada entre a e $a + da$, sendo o ensaio efectuado para diferentes comprimentos de fissura a, daí a variação de A em função de a). O módulo E^* é, então, dado pela relação $K_{IC}^2/E^* = J_{1C}$.



A =frente de fissura
AB =comprimento da zona microfissurada

Fig. 5.11 - *Modelo da fissura fictícia*

Hillerborg e Peterson [143] têm em conta a microfissuração do betão considerando uma lei de comportamento $\sigma - \varepsilon$ não linear na proximidade da frente de fissura. Considerando G_C como uma constante, característica do material, eles propuseram um modelo a que chamaram "modelo da fissura fictícia" permitindo definir um comprimento da zona microfissurada AB e um comprimento de fissura efectiva (Fig. 5.11). O valor de G_C é calculado, utilizando provetes em flexão 3 pontos, através da área sob a curva carga-deslocamento: $A = G_C \Delta S$, onde ΔS é a superfície fissurada. A partir do valor de G_C, Hillerborg e Peterson [143] calcularam W_A (Fig. 5.11) através da relação $\int_0^{W_A} \sigma d\varepsilon = G_C$, o que lhes permite fixar o ponto A e consequentemente o comprimento da zona microfissurada e o da fissura efectiva. As críticas que se podem fazer a este modelo são que ele considera o valor de G_C independente do comprimento da fissura e que utiliza um certo valor médio de $G_C(a)$ uma vez que considera a área sob a curva (P, δ) (Fig. 5.11).

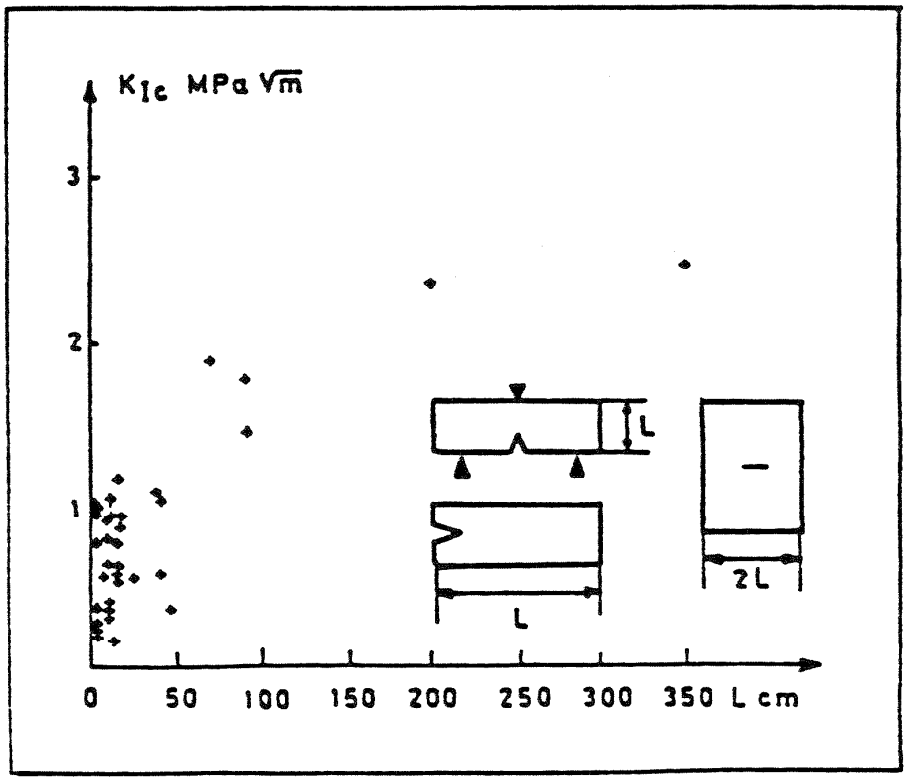


Fig. 5.12 - *Influência da geometria do provete sobre o valor de K_{IC} determinado.*

Reunindo os resultados encontrados nas publicações [113,126] num gráfico em que os valores de K_{IC} são função da dimensão L paralela ao plano de fissura para

diferentes geometrias de provetes (Fig. 5.12) constata-se que as tenacidades (K_{IC}) dependem da dimensão L, o que prova a necessidade de se utilizarem provetes de grandes dimensões para que as hipóteses da mecânica da fractura linear sejam aplicáveis ao betão.

Capítulo 6

Aplicação da mecânica da fractura ao estudo da aderência

6.1 Introdução

A aplicação da mecânica da fractura ao estudo da aderência levanta outros problemas que decorrem da presença de um material estranho, geralmente um polímero que vai efectuar a ligação entre os substratos. Uma das primeiras aplicações foi efectuada por Ripling, Mostovoy e Patrick [144] em 1964, que determinaram o valor de G_C de uma ligação adesiva entre peças de alumínio e uma resina de epóxido.

Os trabalhos experimentais efectuados a seguir, relacionados com a aderência, fizeram quase sempre intervir substratos metálicos (alumínio, aço e cobre, sobretudo). Os resultados destes trabalhos não podem ser transportados directamente para o estudo das ligações adesivas betão/sistemas epóxido porque, por um lado existem diferenças entre as propriedades mecânicas (resistências mecânicas, módulo de elasticidade longitudinal, coeficiente de Poisson, etc). Por outro lado, enquanto que no ensaio das colagens materiais metálicos/sistemas epóxido as roturas são quase sempre do tipo coesivo (ver 7.3.1), quando o substrato é o betão as roturas são do tipo betão (ver 7.3.1). Naturalmente para que isto se verifique é necessário que o sistema de epóxido utilizado na colagem seja indicado para o efeito e que haja um tratamento correcto das superfícies a ligar.

Em 1978, Wang, Mandel e McGarry [145] desenvolveram um estudo teórico baseado no método dos elementos finitos sobre a aplicação da mecânica da fractura ao estudo da aderência. Os resultados obtidos são muito importantes pelo auxílio que prestam à interpretação de qualquer trabalho experimental que se efectue neste domínio.

6.2 Condições de aplicação da mecânica da fractura linear à aderência

Wang, Mandell e McGarry [145] utilizaram nos seus cálculos o provete do tipo DCB (Fig. 6.1). Consideraram uma cola com módulo de elasticidade longitudinal E_1 e coeficiente de Poisson ν_1 e um substrato com módulo de elasticidade longitudinal E_2 e coeficiente de Poisson ν_2.

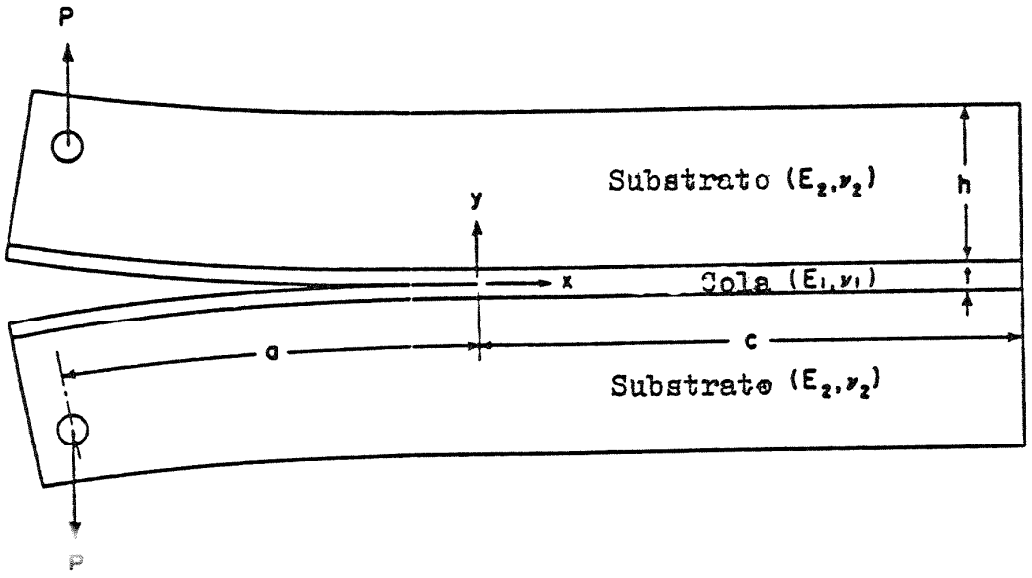


Fig. 6.1 - *Provete tipo DCB*

Eles estudaram a distribuição de tensões na proximidade da frente de fissura fazendo variar os módulos de elasticidade e a espessura da junta adesiva. Embora os resultados tenham sido obtidos para um comprimento de fissura de 51 mm e para uma altura, h, de 13 mm, representam o tipo de campo de tensões encontrado em provetes deste género, em modo de abertura e com juntas adesivas. Alterações da altura do provete ou do comprimento da fissura apenas conduzirão a alterações da intensidade do campo de tensões ou da escala das tensões e distância. Em todo o caso, o carácter essencial das distribuições não sofrerá alterações. A figura 6.1 mostra as coordenadas e dimensões do provete utilizadas no estudo. Os parâmetros considerados são as tensões normais σ_{xx} e σ_{yy}, a tensão de corte no plano, σ_{xy} e o factor de intensidade de tensão na proximidade da frente de fissura, K_I. Os resultados são apresentados de tal forma que sejam independentes da carga aplicada P e foram obtidos para um provete de espessura unitária. Os módulos de elasticidade longitudinal da cola e do substrato no trabalho numérico são considerados

através da relação, E_2/E_1, quociente entre os módulos de elasticidade longitudinal do substrato e da cola.

A figura 6.2 mostra-nos como varia o deslocamento na direcção do eixo dos yy, ao nível da interface cola-substrato na proximidade da frente de fissura. Nesta figura pode ver-se, ainda, a forma como o provete se deforma para diferentes relações de módulos de elasticidade longitudinal. A comparação entre as distorções que se verificam no caso monolítico ($E_2/E_1 = 1$) e as que se verificam para colas mais elásticas, ajuda-nos a caracterizar a natureza geral do problema na região próxima da frente de fissura. Quando a cola é bastante elástica ($E_2/E_1 = 200$), os deslocamentos na interface não apresentam qualquer perturbação na frente de fissura, mas decrescem gradualmente até uma distância bastante afastada desta. Enquanto que a curvatura do provete se altera neste ponto como resposta ao surgimento da cola, a anulação rápida da abertura, que se verifica no caso monolítico, logo após a frente de fissura não parece muito real. Como se verificará adiante, isto indica que os provetes não sofrem um gradiente importante do campo de tensões na frente de fissura, a não ser quando a região singular se localiza no interior da junta adesiva.

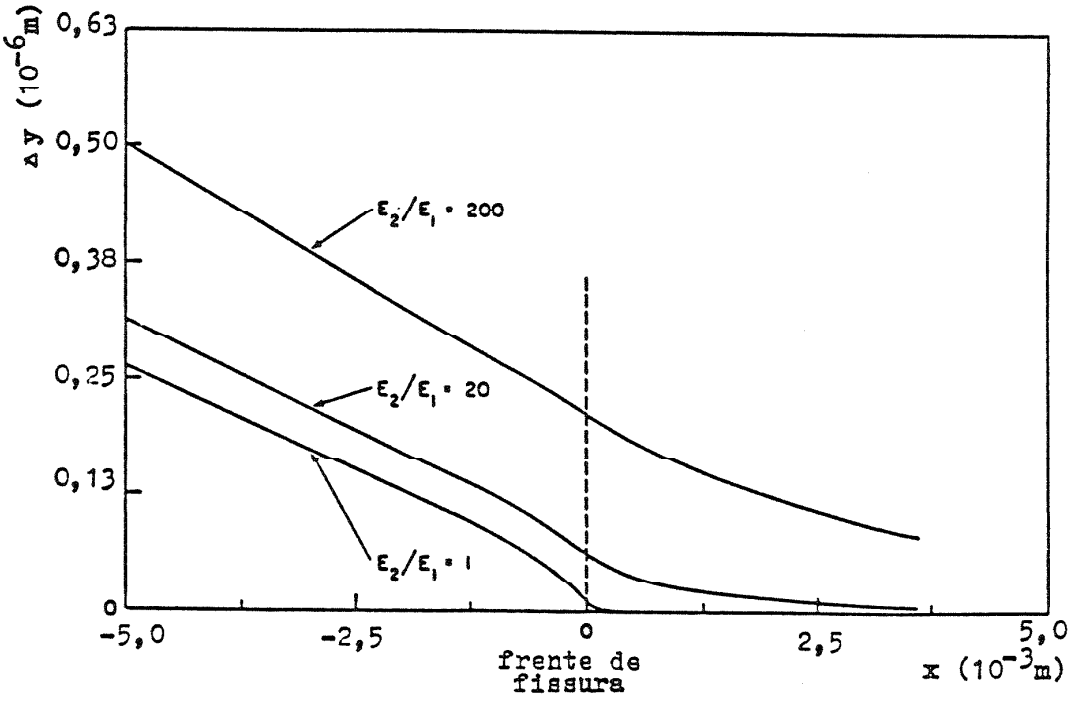


Fig. 6.2 - *Deformada do provete na interface*

É evidente na figura 6.2 que a deformação e tracção na junta adesiva é imposta pelo deslocamento dos substratos relativamente rígidos ao longo da interface. Na

região da frente de fissura, os substratos impõem uma variação lenta do deslocamento ao longo de uma distância de várias espessuras da camada adesiva de cada lado. Quanto mais elástica for a cola relativamente ao substrato, maior é o deslocamento imposto pelo substrato e maior é o comprimento da região ao longo da qual um deslocamento significativo ocorre adiante da fissura.

O factor de intensidade de tensão determinado na frente de fissura, na cola, é função da carga aplicada ao provete e da relação entre módulos de elasticidade longitudinal. A figura 6.3 mostra-nos a variação do factor de intensidade de tensão na cola com a relação entre módulos de elasticidade, para uma gama bastante alargada. Se se apresentarem os resultados numa escala logarítmica verifica-se que estão bem relacionados através de uma linha recta de declive igual a $-1/2$.

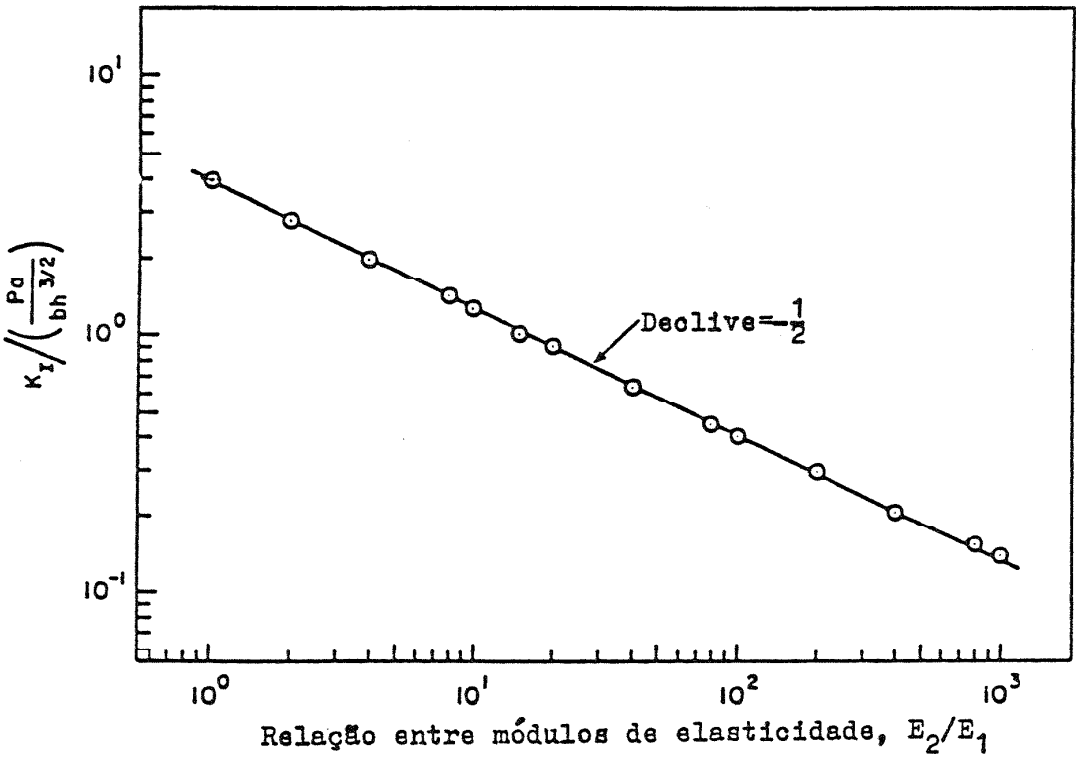


Fig. 6.3 - *Influência da relação entre módulos de elasticidade sobre o factor de intensidade de tensão*

A relação $K - G$ relativa ao sistema adesivo tem que ser estimada considerando a possibilidade de a presença do substrato poder causar perturbações na resposta da frente de fissura. Isto é, particularmente, verdade para uma camada adesiva fina associada a um comprimento de fissura longo, tal como foi considerado no estudo

de Wang e seus colaboradores [145]. Os resultados, tal como são apresentados na figura 6.3, permitem confirmar a relação entre K_I e a taxa de libertação de energia de deformação, G_I, do sistema adesivo se efectuarmos o raciocínio seguinte:

1. O valor de G_I determina-se, em primeiro lugar, fazendo intervir a geometria do provete e o módulo de elasticidade longitudinal do substrato. Pode calcular-se, aproximadamente, utilizando a teoria das vigas, incluindo o efeito de corte [146]:

$$G_I = \frac{4\,P^2}{E_2}\left(\frac{3\,a^2}{h^3} + \frac{1}{h}\right) \tag{6.1}$$

   onde P é a carga aplicada.

   O valor de G_I é praticamente indiferente à presença da cola.

2. K_I, o factor de intensidade de tensão na cola, é calculado através dos resultados dos elementos finitos (não há K_I no substrato, como se verá adiante).

3. Do gráfico da figura 6.3 pode concluir-se que K_I^2 é proporcional a E_2/E_1 e da equação (6.1) que G_I é proporcional a $1/E_2$. A relação entre K_I e G_I é, então, da forma:

$$G_I = f(E_1, E_2, \alpha) K_I^2 \tag{6.2}$$

   onde α é um parâmetro que faz intervir a geometria do provete.

4. A função $f(E_1, E_2, \alpha)$ pode calcular-se de G_I e K_I (1 e 2) e da equação (6.2). Esta função é da forma seguinte:

$$f(E_1, E_2, \alpha) = C\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

   onde C não é função da geometria. Resultados obtidos com provetes DCB de altura variável confirmam a independência desta relação de factores geométricos neste tipo de provetes [145].

5. A substituição de $f(E_1, E_2, \alpha)$ na equação (6.2) dá:

$$G_I = C\left(\frac{E_2}{E_1}\right) K_I^2 \tag{6.3}$$

6. C pode ser determinado para o caso monolítico, $E_2/E_1 = 1$. Neste caso, a relação (6.3) é bem conhecida [147], sendo a seguinte, em estado plano de tensão:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E_2} \tag{6.4}$$

   Substituindo (6.4) em (6.3), vem:

$$C = \frac{1}{E_2}$$

7. Resulta, então, que a relação entre G_I e K_I, para provetes com ligações por colagem deste tipo é:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E_1}$$

Portanto o valor de K_I na cola pode calcular-se para provetes tipo DCB se o valor de G_I é conhecido de uma determinação experimental ou analítica do sistema monolítico. Resultados obtidos por Trantina [148] sugerem que esta conclusão pode ser alargada a outras geometrias desde que a junta adesiva se mantenha com pouca espessura.

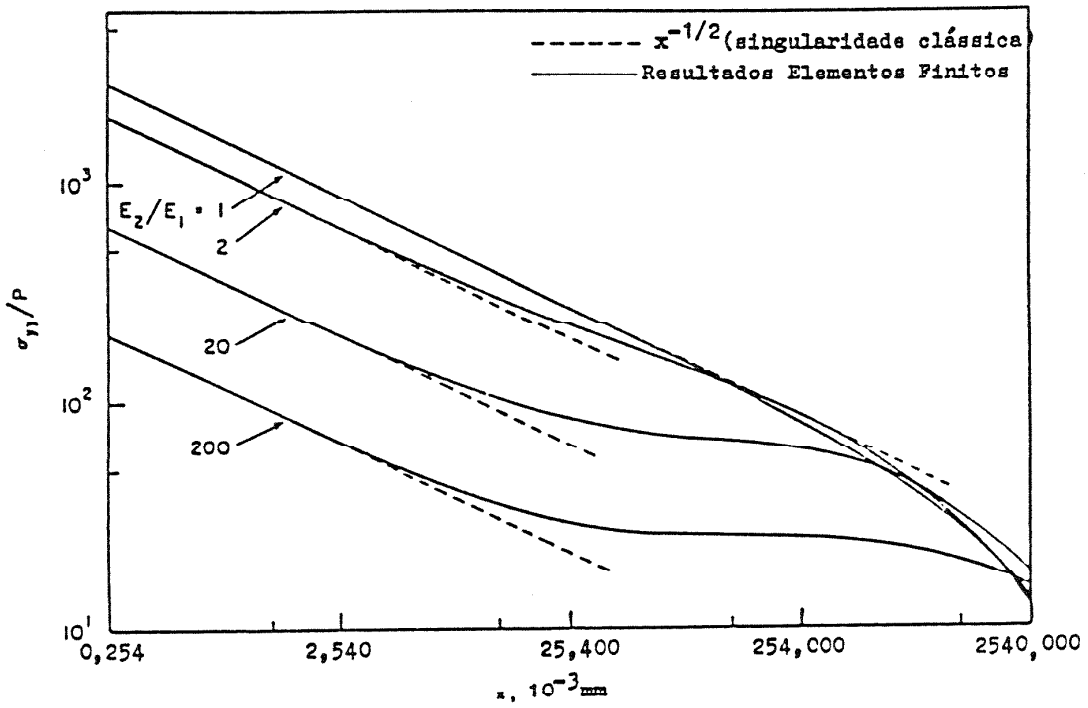


Fig. 6.4 - *Influência da relação de módulos de elasticidade longitudinal na tensão σ_{yy} na proximidade da frente de fissura.*

As figuras 6.4 e 6.5 mostram-nos como varia a tensão normal, σ_{yy}, ao longo dos eixos dos xx e dos yy, respectivamente, na proximidade da frente de fissura. A distribuição de tensões é semelhante à que seria de esperar num sistema monolítico dominado pela singularidade $1/\sqrt{r}$ na proximidade da frente de fissura. Quanto mais nos afastarmos desta, a distribuição de tensões apresenta um comportamento diferente do do caso monolítico. No entanto, a região ao longo da qual o comportamento

singular domina é bastante reduzida nos sistemas adesivos ($E_2/E_1 > 1$) quando comparada com a do sistema monolítico ($E_2/E_1 = 1$). A tensão na proximidade da frente de fissura reduz-se, significativamente à medida que E_2/E_1 aumenta como decorria da figura 6.3. Quando nos afastamos da frente de fissura verifica-se o inverso, uma vez que é necessário manter o equilíbrio de forças. Comportamentos diferentes do caso monolítico ocorrem muito próximos da frente de fissura, para os casos adesivos. A figura 6.5 mostra que o comportamento singular se prolonga para dentro do substrato quando $E_2/E_1 = 1$. Para relações de módulos de elasticidade longitudinal mais elevadas não há, praticamente, distribuição singular no substrato, o que quer dizer que o domínio singular se localiza na cola e próximo da frente de fissura.

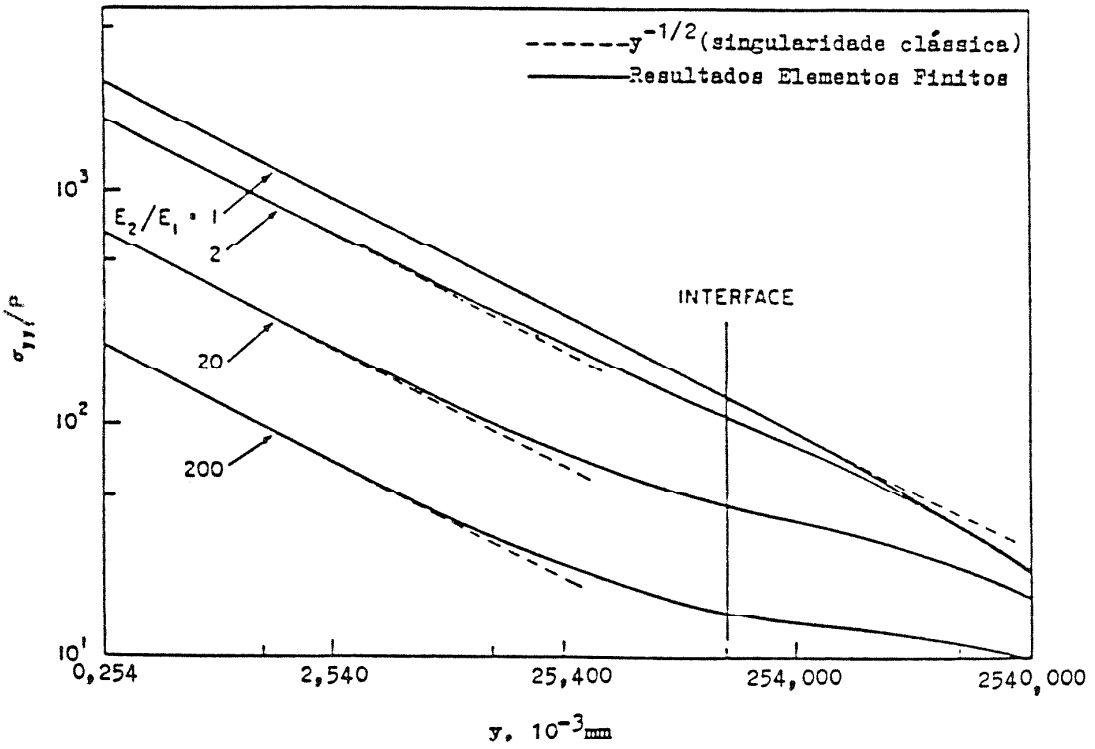


Fig. 6.5 - *Influência da relação de módulos de elasticidade longitudinal na tensão σ_y ao longo do eixo do yy.*

Na figura 6.6 pode ver-se que a variação da espessura da junta adesiva não tem influência sobre K_I, o que confirma o confinamento do domínio singular, característica da mecânica da fractura linear. Este resultado foi encontrado para várias

relações de módulos de elasticidade longitudinal (a altura do provete, h, é de 13 mm para todos os casos). As figuras 6.7 e 6.8, mostram-nos que a espessura influencia a distribuição de tensões a pequenas distâncias da frente de fissura, embora as curvas tenham um mesmo ponto de convergência nesta e o comportamento singular seja dominante.

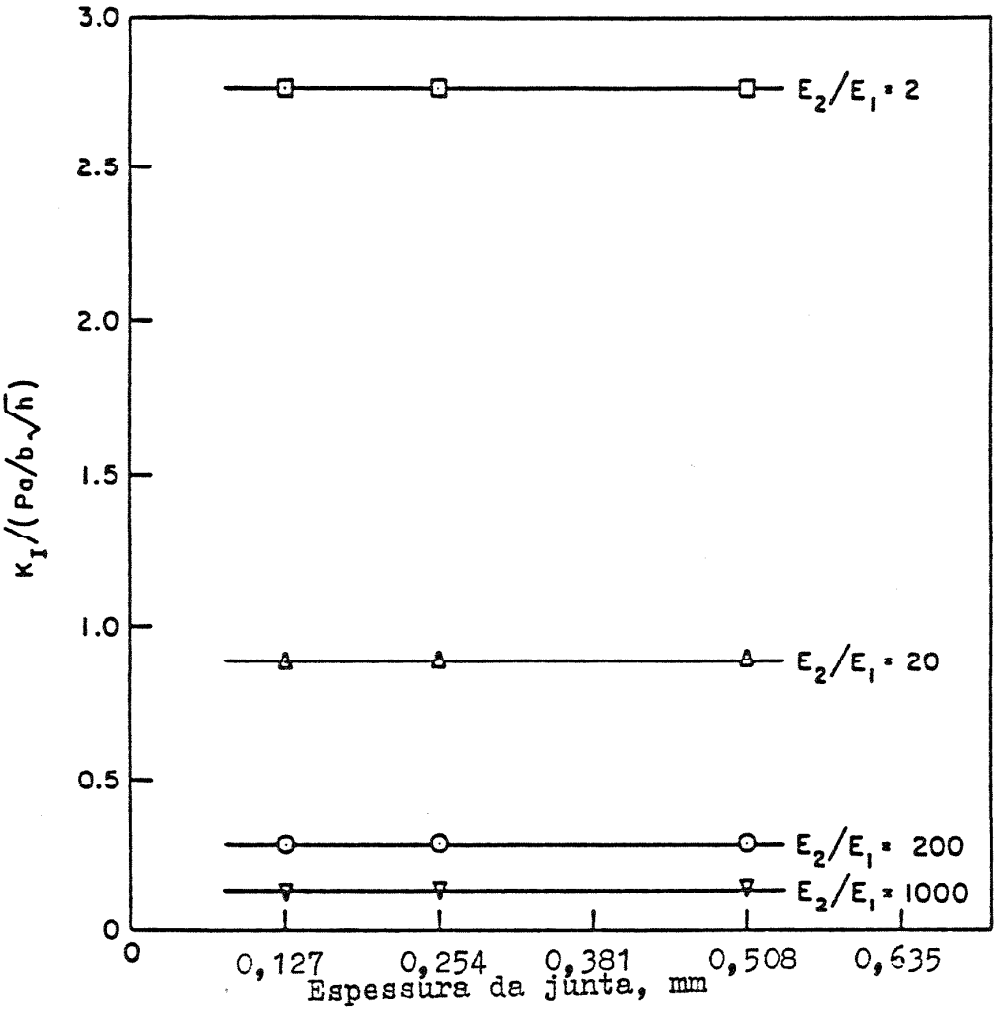


Fig. 6.6 - *Influência da espessura da junta no factor de intensidade de tensão para provetes DCB com diferentes relações de módulos de elasticidade longitudinal.*

Os afastamentos do comportamento singular são evidentes na escala alargada da figura 6.9. Para os sistemas adesivos, o afastamento do comportamento singular, para um dado valor de x, aumenta quando a espessura da cola diminui. O valor

de x a partir do qual ocorre um acréscimo de afastamento é, aproximadamente, proporcional à espessura da junta adesiva. Voltando à figura 6.4, verifica-se que o valor de x a partir do qual ocorre um acréscimo particular de afastamento não é influenciado pela relação de módulos de elasticidade longitudinal, mesmo quando $E_2/E_1 > 1$. Estas constatações sugerem que a extensão da região onde o comportamento singular se faz sentir é imposta pela espessura da junta adesiva, enquanto que em sistemas monolíticos a mesma extensão é imposta pelo comprimento da fissura ou pelas dimensões dos provetes. O valor de x a partir do qual a tensão se afasta 10% da relação singular é aproximadamente $t/40$ para sistemas adesivos e $h/33$ para sistemas monolíticos, com $t = h/50$. Como se sabe a localização do domínio singular tem implicações sobre os limites de aplicação de K_{IC} como critério de fractura.

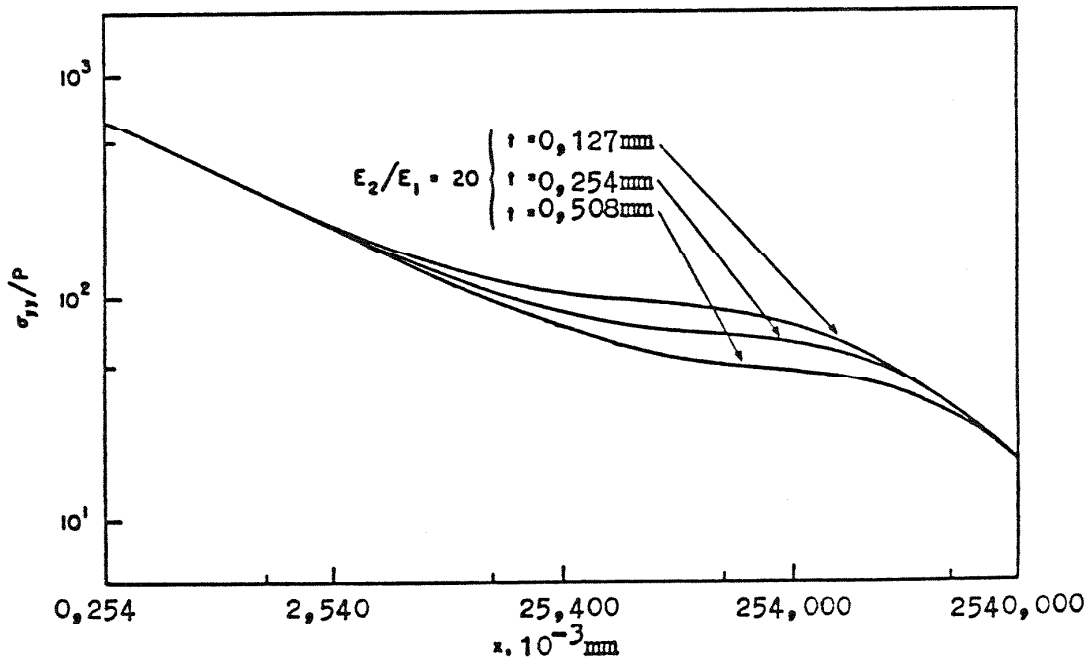


Fig. 6.7 - *Influência da espessura da junta sobre a tensão σ_{yy} ao longo do eixo dos xx.*

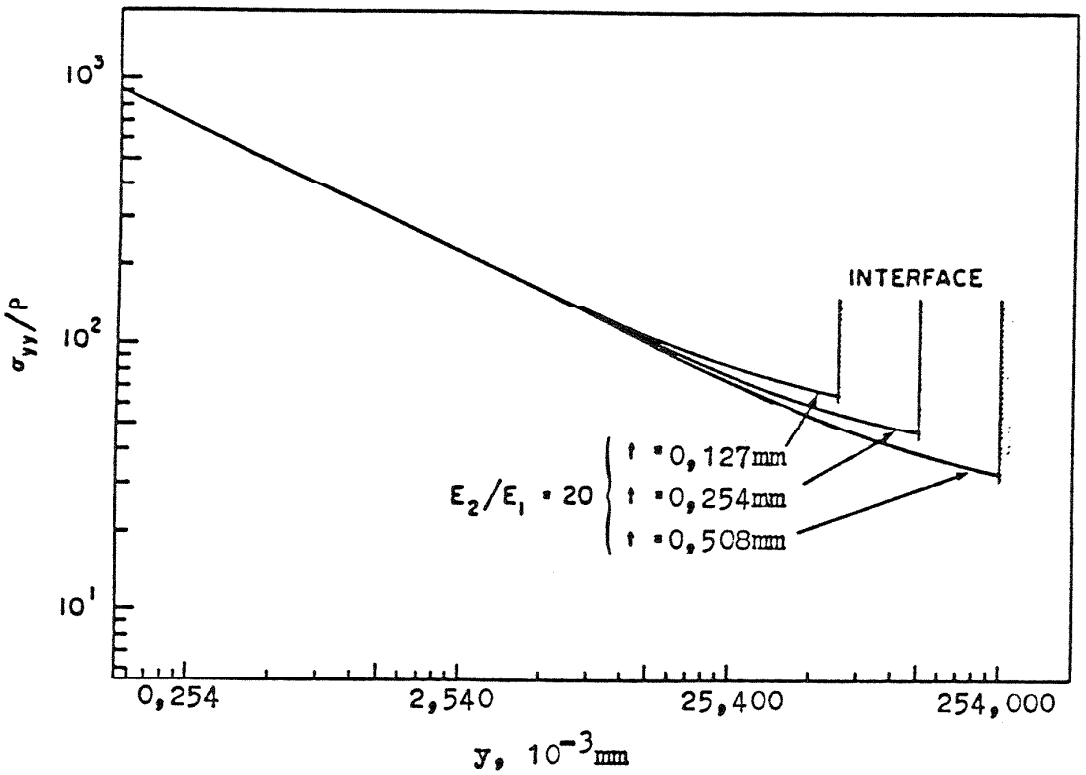


Fig. 6.8 - *Influência da espessura da junta sobre a tensão σ_{yy} ao longo do eixo dos yy.*

A figura 6.10 mostra-nos a variação de σ_{yy} quando nos afastamos da frente de fissura, ao longo do comprimento total do provete. Como se poderia prever pelo equilíbrio de forças, a tensão diminui e chega mesmo a ser de compressão a distâncias da frente de fissura de algumas dezenas de centímetros. A tensão máxima de compressão é apenas uma pequena fracção da tensão de tracção na proximidade da frente de fissura.

As figuras 6.11 a 6.13 mostram-nos a variação de tensões σ_{yy}, σ_{xx} e σ_{xy}, respectivamente, ao longo da espessura da cola e no interior do substrato, a diferentes distâncias da frente de fissura. As curvas que representam as variações de tensões σ_{yy} e σ_{xy} são contínuas ao atravessar a interface, enquanto que as da tensão σ_{xx} são descontínuas devido à alteração do módulo de elasticidade (o deslocamento correspondente é contínuo). Nas figuras 6.11 a 6.13 verificamos que o campo de tensões a uma distância da frente de fissura superior à espessura da cola é efectivamente

uniforme ao longo da junta adesiva, tal como é imposto pelos substratos. Estamos, assim, em presença de mais uma indicação sobre a localização das perturbações da frente de fissura no sistema adesivo.

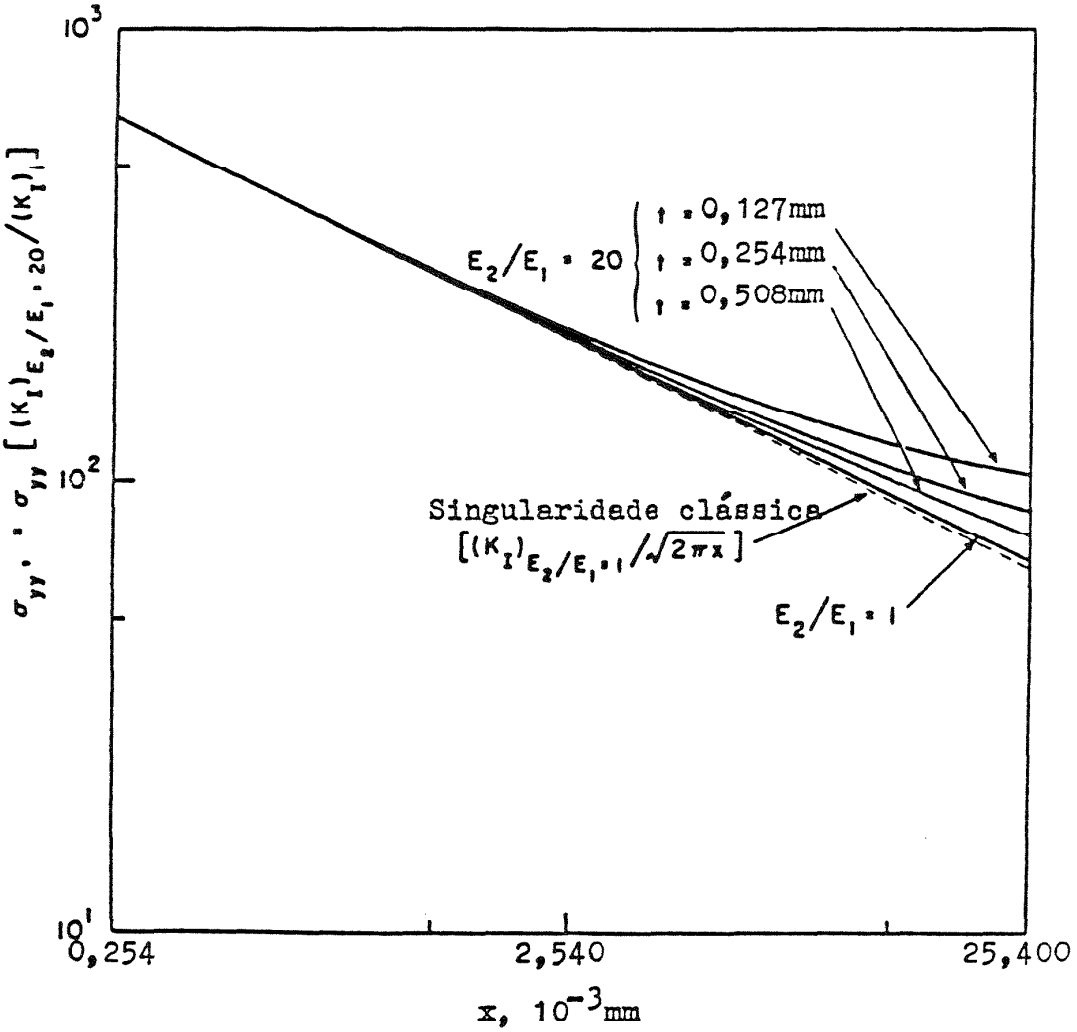


Fig. 6.9 - *Afastamento de σ_{yy} do comportamento singular numa região próxima da frente de fissura*

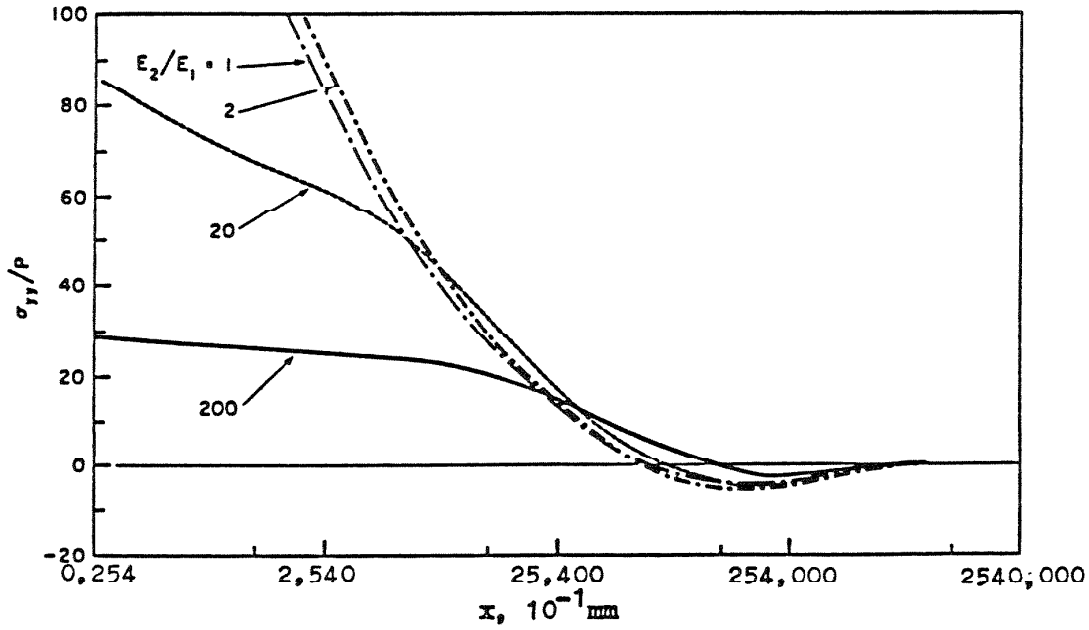


Fig. 6.10 - *Variação de σ_{yy} quando nos afastamos da frente de fissura.*

As figuras 6.14 a 6.16 mostram-nos como variam as tensões ao longo da interface cola-substrato. Verifica-se sempre um crescimento rápido da tensão à medida que nos aproximamos da frente de fissura, a partir de uma distância inferior à espessura da camada adesiva. As tensões σ_{xx} e σ_{yy} atingem os seus valores máximos imediatamente na proximidade da frente de fissura e depois diminuem lentamente. A tensão σ_{xy} atinge o valor mais elevado (em valor absoluto) imediatamente antes da frente de fissura e diminui rapidamente à medida que nos afastamos deste. Embora as tensões ao longo da interface estejam concentradas na proximidade da frente de fissura, elas são de valor significativamente inferior ao das que se verificam no interior da cola (Figs. 6.11 a 6.13).

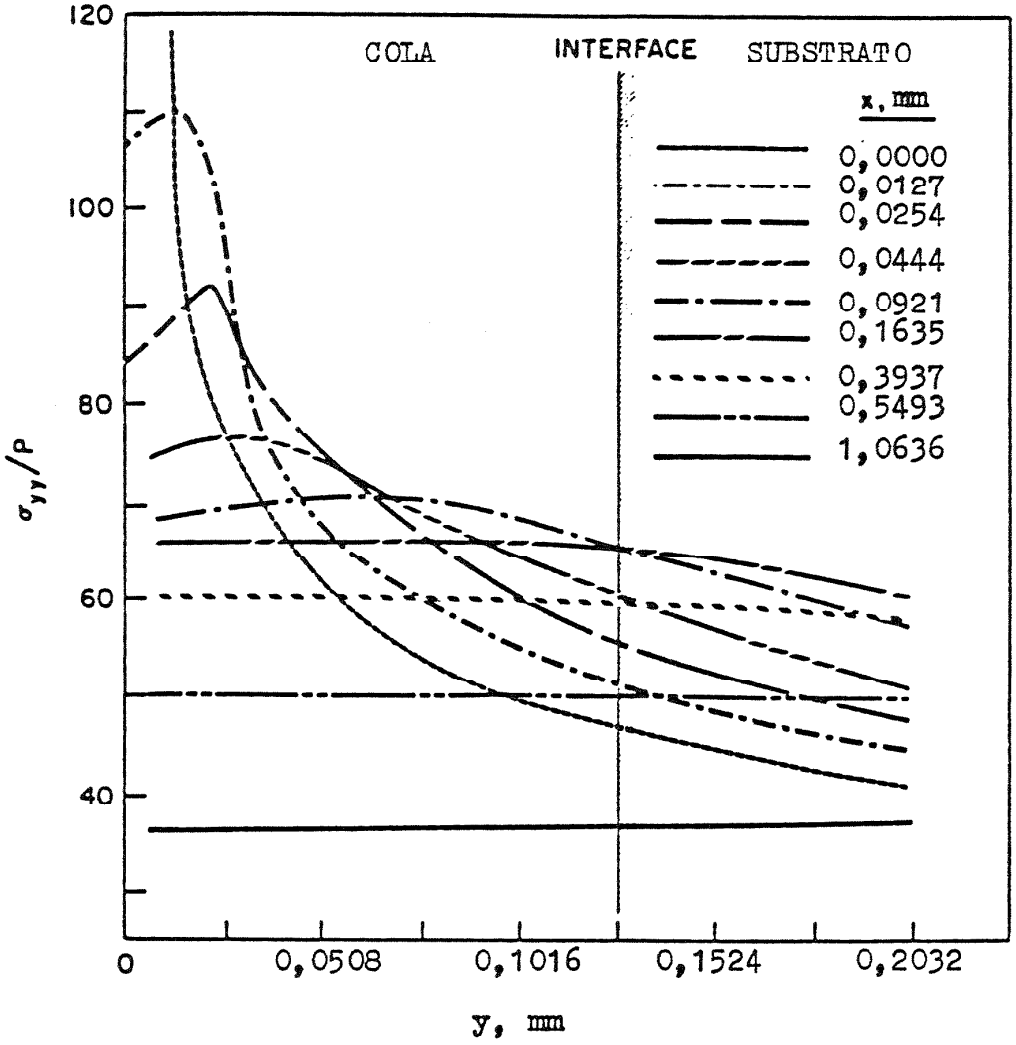


Fig. 6.11 - *Tensão σ_{yy} ao longo de rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$.*

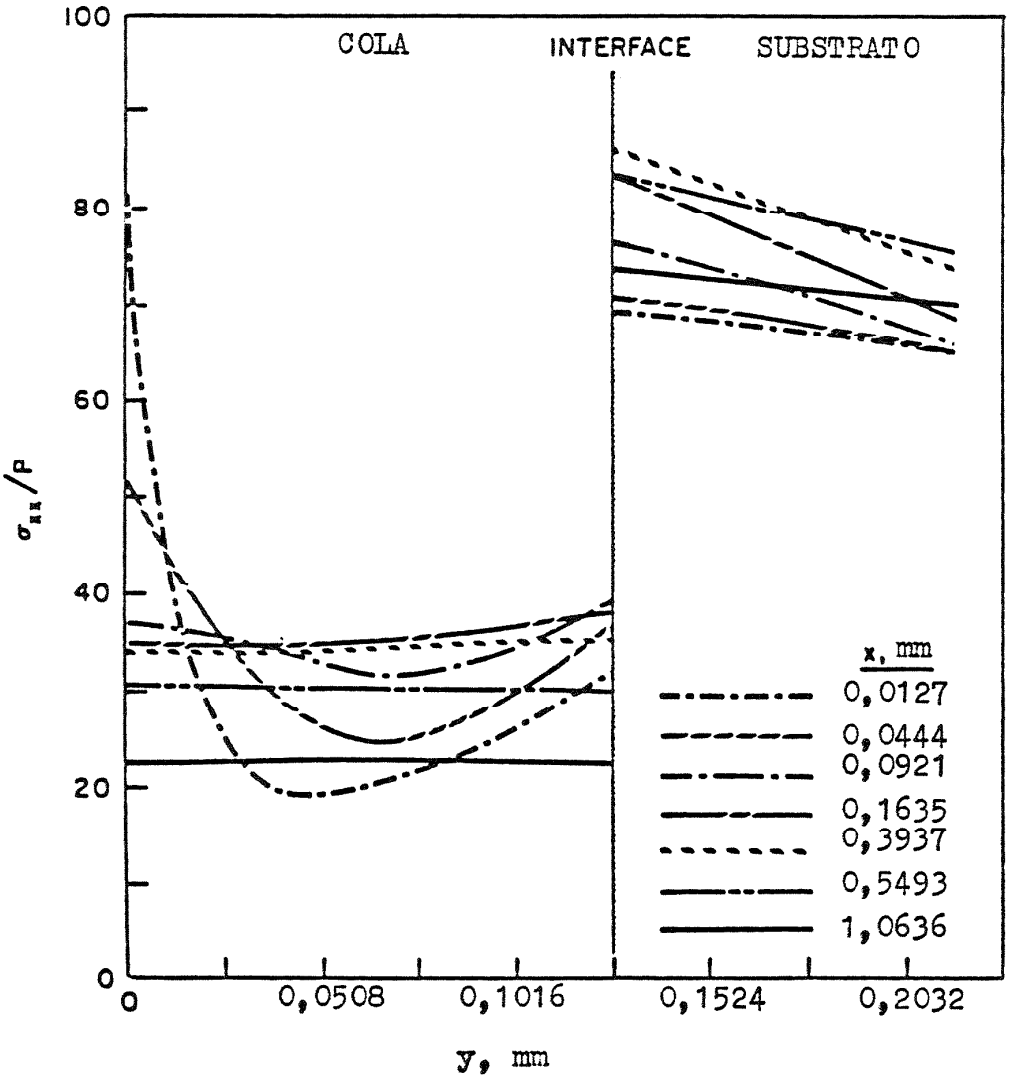


Fig. 6.12 - *Tensão σ_{xx} ao longo de linhas rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$.*

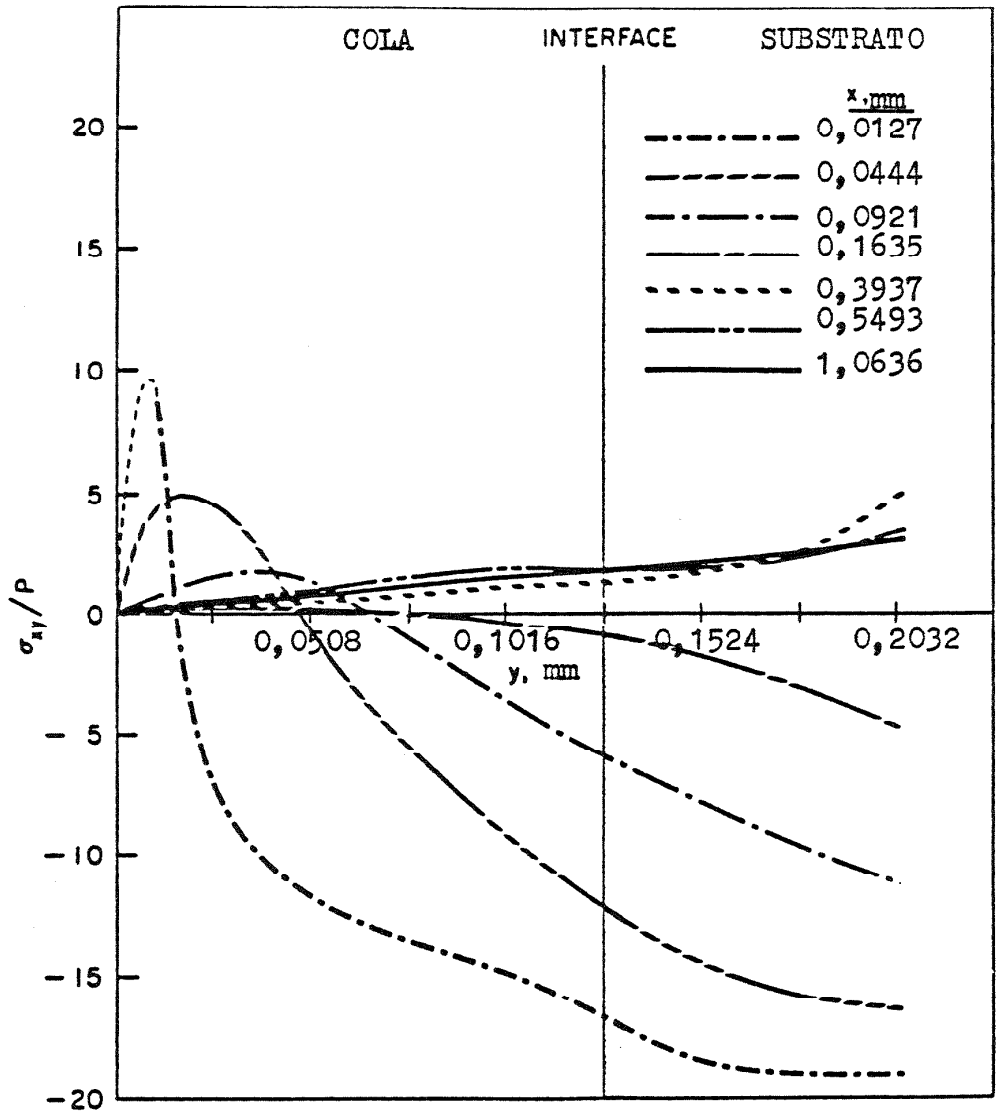


Fig. 6.13 - *Tensão σ_{xy} ao longo de linhas rectas normais ao eixo dos xx, $E_2/E_1 = 20$.*

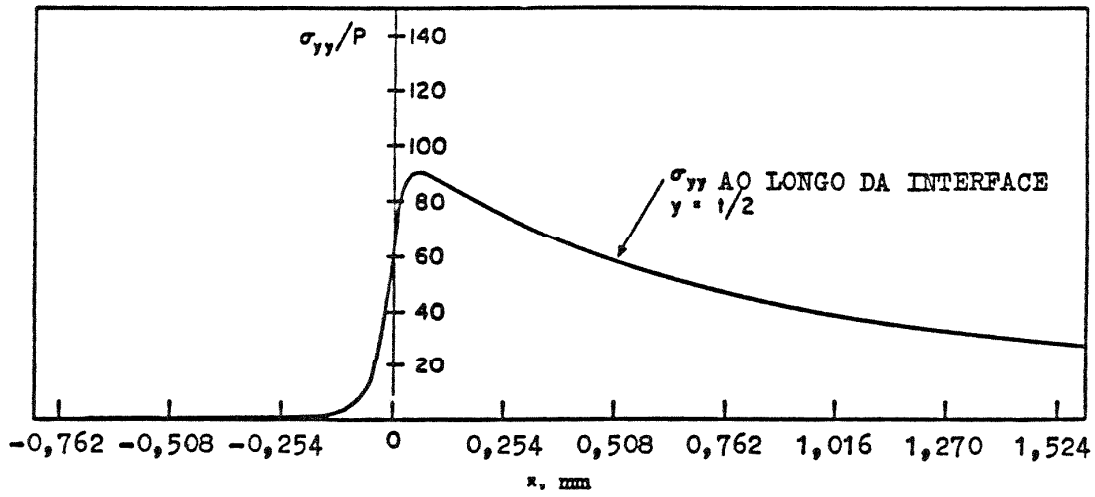


Fig. 6.14 - *Tensão σ_{yy} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$.*

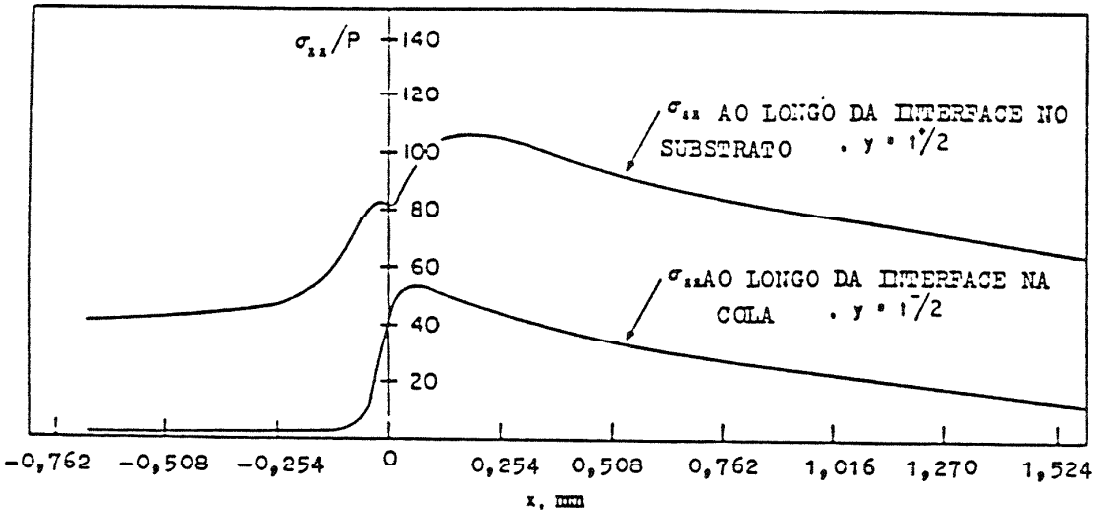


Fig. 6.15 - *Tensão σ_{xx} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$*

De notar que o estudo desenvolvido por Wang, Mandel e McGarry [145] não considera o efeito de tensões residuais devidas a contracções por diminuição de temperatura, nem a influência que a diferença de coeficiente de Poisson provoca nas tensões segundo a terceira direcção ao nível da interface. Estes efeitos, assim como o comportamento não elástico da cola podem ser de grande importância no comportamento dos sistemas adesivos.

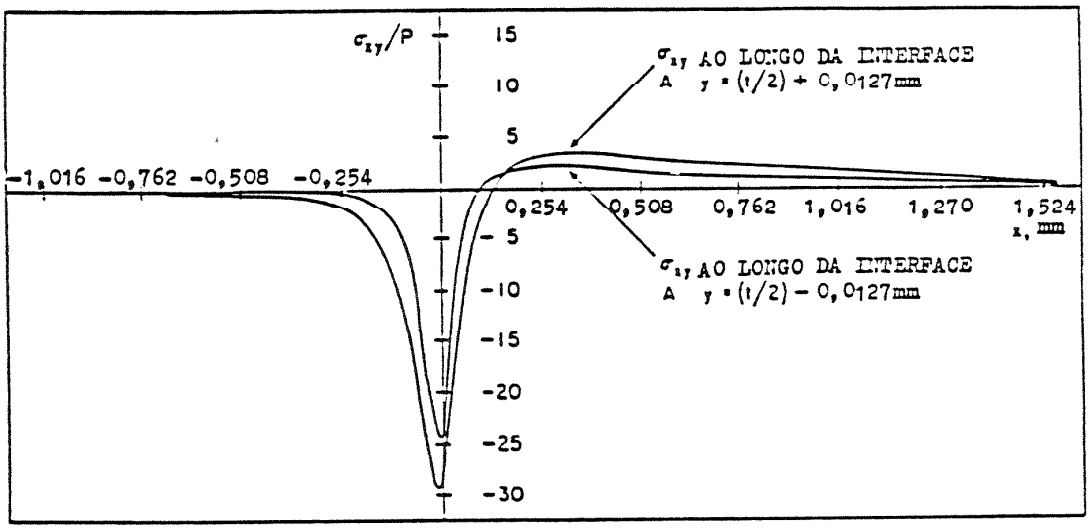


Fig. 6.16 - *Tensão σ_{xy} ao longo da interface, $E_2/E_1 = 20$.*

Resumindo, o estudo de Wang e seus colaboradores [145] permite-nos concluir o seguinte:

1 - existe uma singularidade no campo de tensões que pode descrever-se pelo factor de intensidade de tensão e pela taxa de libertação de energia de deformação utilizados em mecânica da fractura linear;

2 - embora G_I se determine em primeiro lugar pelas propriedades mecânicas do substrato, K_I é proporcional à raiz quadrada do módulo de elasticidade longitudinal da cola, para um dado substrato;

3 - K_I é independente da espessura da cola devido ao domínio de tensão singular se localizar no interior da cola;

4 - a distância para além da frente de fissura, na qual um comportamento singular é dominante, é limitada no caso adesivo a uma pequena fracção da espessura da cola, enquanto que a dimensão correspondente para o caso monolítico é a altura do provete;

5 - o campo de tensões no substrato não é singular e não é caracterizado pelos gradientes de tensão típicos de um campo de tensões de frente de fissura;

6 - o campo de tensões na cola torna-se praticamente uniforme a uma distância da frente de fissura inferior à espessura da junta adesiva.

6.3 Aderência entre materiais metálicos e sistemas epóxido

Ripling, Mostovoy e Patrick [144] estudaram, em 1964, o efeito da geometria da junta adesiva, do comprimento do provete, da velocidade de propagação da fissura e do modo de rotura sobre a resistência à fractura de uma ligação entre alumínio e um sistema epóxido. O provete utilizado foi o D.C.B. quer em modo I, quer em modo II. A taxa de libertação da energia de deformação é calculada pelo método da complacência. Os provetes têm as dimensões de $6 \times 13 \times 25\ mm^3$.

Os resultados obtidos mostram que a característica que mais influencia o G_C é a velocidade de propagação da fissura. Quanto mais lenta for a propagação maior é a taxa de libertação da energia de deformação. As roturas do tipo adesivo (ver 7.3.1) apresentam um G_C superior ao das do tipo coesivo (ver 7.3.1). Para o provete utilizado, o valor de G na frente de fissura diminui com o aumento de comprimento desta. Por último, a taxa de libertação da energia de deformação das juntas adesivas é mais elevada quando a propagação se dá em modo II do que em modo I.

Em 1975 uma norma ASTM [149] fixa as dimensões e as técnicas de ensaio de provetes tipo DCB utilizados para determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação de ligações adesivas. Dois tipos de provetes são previstos: altura constante (Fig. 6.17) e altura variável (Fig. 6.18). O provete com altura variável tem a vantagem de simplificar os cálculos uma vez que a variação da altura é escolhida de forma que para cada comprimento de fissura, a, a expressão

$$\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h}$$

seja constante e igual a m.

Como G é dado pela expressão:

$$G = \frac{4\,P^2}{E\,B^2}\left(\frac{3\,a^2}{h^2} + \frac{1}{h}\right) \tag{6.5}$$

onde P é a carga aplicada, resulta quo no caso do provete DCB com altura variável a expressão (6.5) se transforma em:

$$G = \frac{4\,P^2}{E\,B^2} m.$$

Portanto, a taxa de libertação de energia de deformação é, neste caso, independente do comprimento da fissura.

Em 1971, Mostovoy, Ripling e Bersch [150], tinham já utilizado este tipo de provete para determinar a taxa de libertação de energia de deformação de juntas adesivas de resina epóxido. Dois tipos de endurecedor foram utilizados, verificando-se que o endurecedor à base de aminas ($TEPA$) é mais sensível à variação da quantidade com que é adicionado à base e à variação da temperatura de cura que oendurecedor anidrido (HHPA). Os aderentes utilizados foram o alumínio, o aço e o vidro. Os resultados mostram que o tipo de rotura dominante é o coesivo (ver 7.3.1) e que o valor de G_{IC} não é influenciado pelo tipo de aderente utilizado.

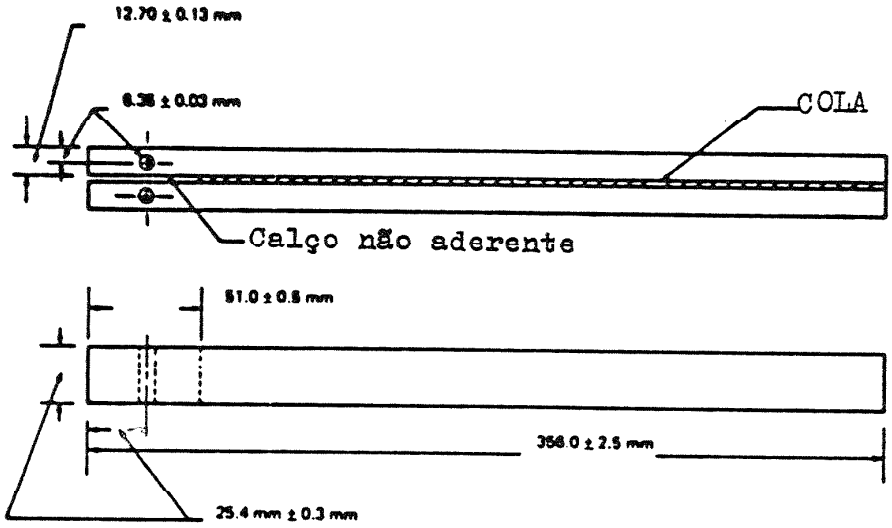


Fig. 6.17 - *Provete DCB com altura constante*

O mesmo provete DCB com altura variável foi utilizado por Hine, Muddarris e Packham [151] para estudar a aderência de uma resina epóxido do tipo D.G.E.B.A. a superfícies de aço e de cobre. As superfícies destes dois materiais foram submetidas a tratamentos especiais por forma a tornarem-se microfibrosas. Os resultados mostram um aumento significativo de G_{IC} quando se efectua o tratamento das superfícies.

Handani e Coddet [152] determinaram a taxa de libertação da energia de deformação de ligações entre aço galvanizado e um sistema epóxido (com espessura da junta de $0,36\ mm$). Os cálculos de G_{IC} efectuaram-se por três métodos diferentes, decorrentes do método da complacência. Este método, apresentado no capítulo III,

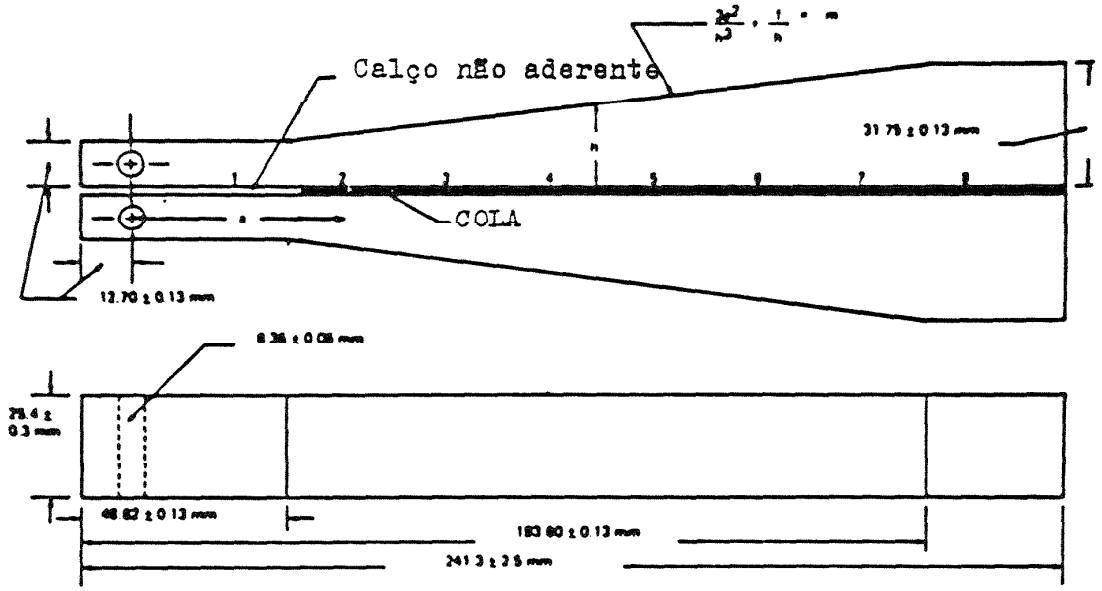


Fig. 6.18 - *Provete DCB com altura variável*

diz-nos que a taxa de libertação de energia de deformação é dada pela expressão:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2b}\frac{\partial c}{\partial a} \tag{6.6}$$

onde $c = \frac{\delta}{P}$ = complacência e os restantes símbolos estão representados na figura 6.19.

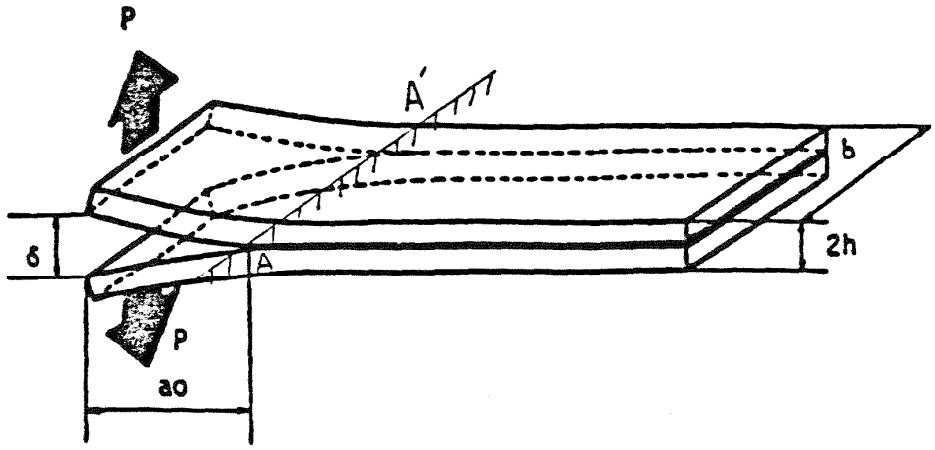


Fig. 6.19 - *Provete tipo D.C.B.*

O primeiro método decorre de se determinar o comprimento de fissura considerando o provete D.C.B. como perfeitamente encastrado na frente de fissura (Fig. 6.19), donde:

$$\frac{\delta}{2} = \frac{Pa^3}{3EI} \tag{6.7}$$

onde E = módulo de elasticidade longitudinal
$I = \frac{bh^3}{12}$ = momento de inércia

substituindo em (6.6) $\frac{\partial c}{\partial a}$ tirado de (6.7) obtemos:

$$G_{IC} = \frac{12P^2a^2}{E\,b^2h^3}$$

O segundo método considera a rotação dos dois braços do provete na frente de fissura e foi proposto por Berry [153] que afirma que um encastramento perfeito não existe neste caso e propõe, então, uma nova expressão para a complacência:

$$C = \frac{a^n}{h} \tag{6.8}$$

os parâmetros n e h são determinados experimentalmente através de provetes com diferentes comprimentos iniciais de fissura. Substituindo dC/da obtido de (6.8) em (6.6) temos:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2b}(n\frac{a^{n-1}}{h}) \tag{6.9}$$

e combinando (6.6) e (6.9)

$$G_{IC} = n\frac{P\delta}{2ab}$$

O terceiro método baseia-se na consideração da natureza imperfeita das condições limite e foi sugerido por Wilkins [154]. Considera $C = A_1\,a^3$ e faz intervir um coeficiente $A_2 = Pa$ o que dá:

$$G_{IC} = \frac{3}{2}\frac{A_1\,A_2^2}{b}$$

Os ensaios efectuados por Handani e Coddet [152] mostram, tal como concluiram Ripling, Mostovoy e Patrick [144], que quanto maior for a velocidade do ensaio menor é a taxa de libertação da energia de deformação. Por outro lado, os três métodos utilizados nos cálculos, conduzem, praticamente, ao mesmo valor para G_C.

Capítulo 7

Comportamento mecânico das ligações por colagem entre polímeros e betão

7.1 Introdução

O objectivo do nosso trabalho é o estudo das ligações por colagem entre polímeros e betão. Como vimos no capítulo 2, o aparecimento de materiais orgânicos no domínio da construção fez, destes, um processo de ligação original e susceptível de proporcionar trabalhos interessantes, embora o seu custo seja elevado.

O nosso estudo da aderência entre polímeros e betão tem por finalidade a obtenção de algumas respostas para as perguntas que, actualmente, se colocam. Resultados obtidos anteriormente [11], utilizando ensaios de tracção directa, mostram que a aderência em meio seco não coloca problemas muito grandes. Em face disto, efectuámos grande parte do nosso estudo sobre as colagens quando o aderente se encontra húmido ou seja em presença da água. Esta situação parece-nos mais real porque na prática é difícil encontrar obras de betão em que este se apresente totalmente isento de humidade.

O trabalho de Troncy [12] mostra-nos que uma boa aderência sobre suporte húmido pode obter-se se utilizarmos um epóxido adicionado de uma carga calcária ou siliciosa e se escolhermos uma espessura conveniente. Pela nossa parte, interessámo-nos por estudar a influência da quantidade, granulometria e natureza das cargas introduzidas no epóxido sobre a aderência. Os ensaios de tracção directa efectuaram-se com epóxidos adicionados de cargas calcárias ou siliciosas. Tendo em conta estudos anteriores [11,12] a espessura das juntas de ligação foi, inicialmente, fixada em $0,6\ mm$. Para estudar a influência da natureza das cargas, estas foram escolhidas com granulometrias comparáveis.

O estudo que efectuámos sobre a influência da espessura na aderência conduziu-nos, mais tarde, à realização de ensaios com 1 *mm* de espessura da junta adesiva. A necessidade de aprofundar, cada vez mais, o estudo da aderência levou-nos à realização de ensaios baseados nos princípios da mecânica da fractura. Estes ensaios permitem-nos a determinação da taxa de libertação de energia de deformação. Esta grandeza tem em consideração a concentração de tensões nos defeitos dos materiais ou nas ligações entre materiais, pelo que nos parece muito interessante a sua determinação.

Como vimos no capítulo 3, a taxa de libertação de energia de deformação depende, entre outros, da carga aplicada e do comprimento das fissuras existentes. Assim, o conhecimento da taxa crítica de libertação da energia de deformação permitir-nos-á calcular o comprimento crítico de uma fissura para uma dada carga ou a carga crítica para um dado comprimento de fissura.

7.2 Formulação dos polímeros

7.2.1 Escolha do tipo de polímero

Os epóxidos são os polímeros que melhor respondem às exigências das colagens betão/betão, como vimos no capítulo 1. Outros polímeros possuem propriedades aderentes mas não são de indicar para este tipo de colagens. As colas de poliester ou de poliuretano toleram mal a humidade. As colas de poliester têm, em geral, uma retracção muito elevada e podem saponificar em contacto com o betão.

Tentados pelo seu baixo custo (cerca de 1/3 do dos epóxidos) efectuámos alguns ensaios com colas de poliesteres insaturados. Os resultados não foram nada satisfatórios porque se obtiveram sempre roturas adesivas (ver 7.3.1). Em face disto, todos os estudos posteriores efectuaram-se com epóxidos puros ou com cargas minerais.

Para os nossos estudos, escolhemos dois epóxidos, um de presa lenta que designaremos por X e outro de presa rápida que designaremos por Y.

7.2.2 Epóxidos

7.2.2.1 Propriedades

Os componentes dos epóxidos utilizados são uma base, um endurecedor aminado e uma carga mineral, calcária ou siliciosa. A incorporação de uma carga provoca

modificações das propriedades físicas e químicas da cola não endurecida (cinética de polimerização, molhabilidade, massa volúmica, etc.) e das propriedades mecânicas do produto endurecido (resistências mecânicas, módulo de elasticidade, etc.).

R. Lamouri [11] determinou o ângulo de contacto de um epóxido sobre lâmina de vidro em função da dosagem em diluente, endurecedor e carga mineral (Fig. 7.1). A presença da carga conduz a um aumento do ângulo de contacto e consequentemente a uma diminuição da molhabilidade.

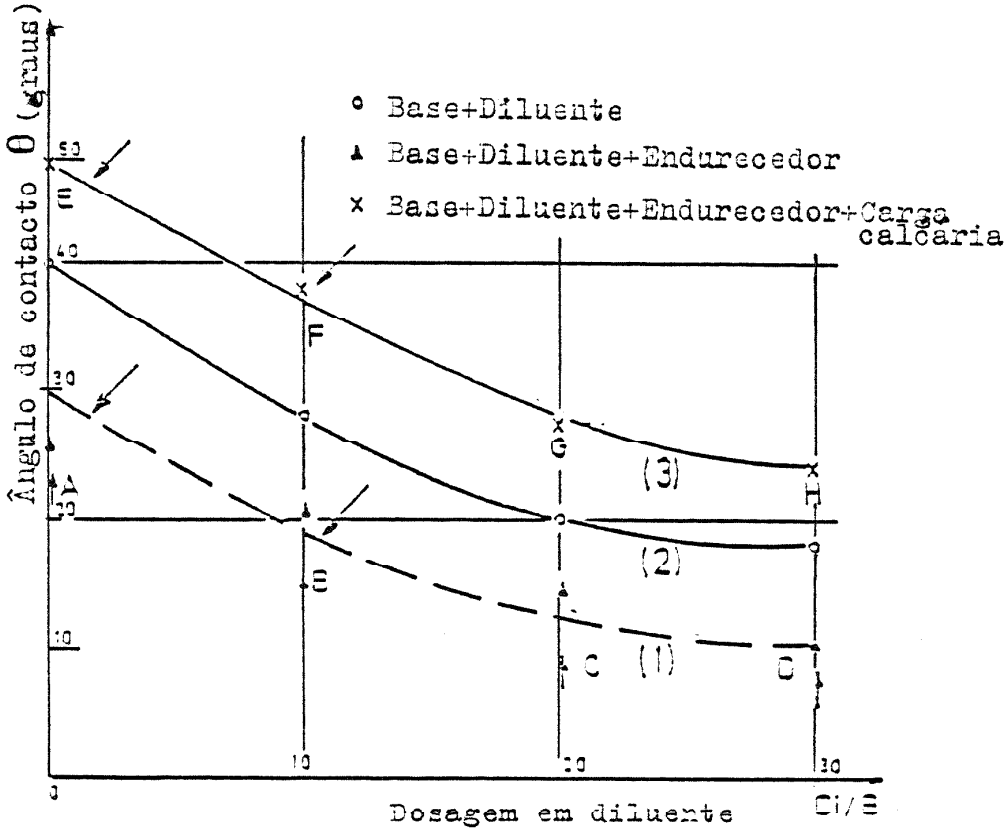


Fig. 7.1 - *Ângulo de contacto em função da dosagem de diluente, endurecedor e carga mineral [11]*

A presença de cargas nos epóxidos conduz, ainda, a um aumento do módulo de elasticidade e a uma diminuição do coeficiente de Poisson (Fig. 7.2). Assim, R. Lamouri [11] verificou que o módulo de elasticidade do polímero com 100% de carga calcária é de 8,5 GPa e com 200% é de 16 GPa, respectivamente, cerca do dobro e do quádruplo do do sistema puro que é de 3,6 GPa (Fig. 7.3). O coeficiente de Poisson praticamente não se altera do polímero puro para o polímero com 100% de

carga calcária, mas com 200% de carga passa de 0,3 a 0,25. A resistência à rotura não melhora significativamente (cerca de 10%).

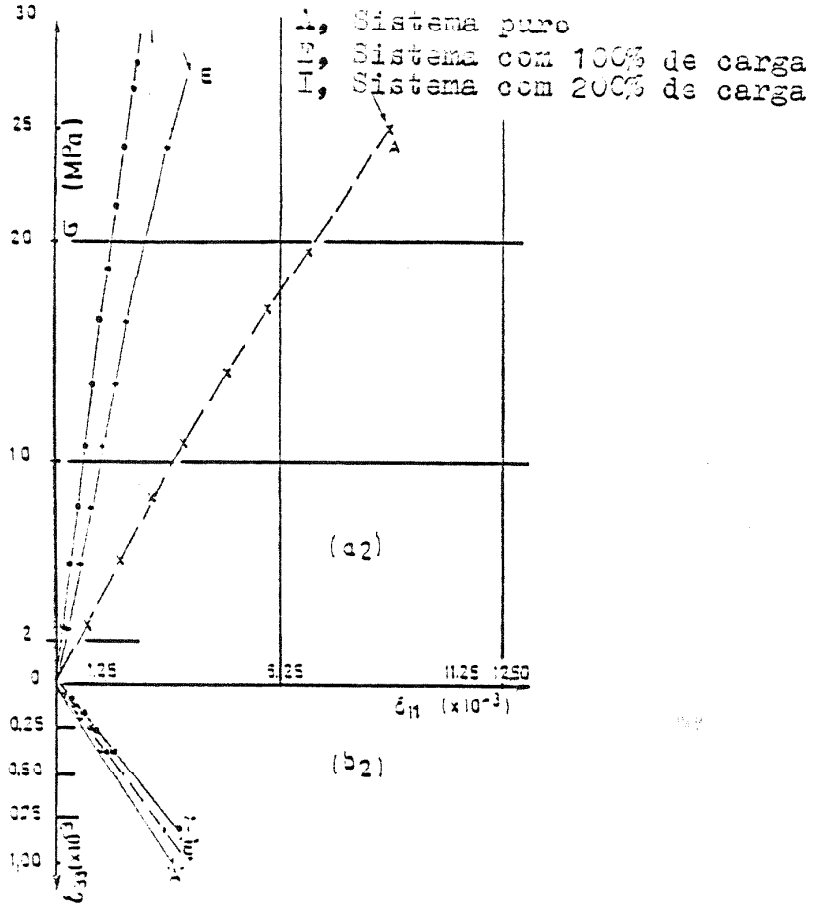


Fig. 7.2 - *Curvas esforços-deformações dos sistemas epóxido*

7.2.2.2 Definição dos componentes

7.2.2.2.1 Epóxidos puros

Cada epóxido puro é composto por uma base e por um endurecedor.

A base do epóxido *X* é uma resina epóxido tipo D.G.E.B.A.. O endurecedor é uma mistura de aminas cíclicas e de álcool benzílico. As proporções de mistura dos dois componentes são de 33 partes em peso de endurecedor para 100 partes em peso da resina.

7.2.2.2.2 As cargas minerais

As cargas minerais são obtidas por mistura de dois produtos de base comercializados em França. Assim, escolhemos duas cargas calcárias e misturámo-las em proporções variáveis. As curvas granulométricas obtidas por raios laser apresentam-se do Anexo 1.

QUADRO 7.2

Calcário 1	80%	65%	20%
Calcário 2	20%	35%	80%
Superfície específica (cm^2/g)	53000	44000	17000
Massa volúmica (g/cm^3)	2.70	2.70	2.70
$\%D \leq 4$ microns	78	68	33
$\%D \leq 50$ microns	98	97	94

QUADRO 7.3

Sílica 1	65%	50%	20%
Sílica 2	35%	50%	80%
Superfície específica (cm^2/g)	16175	13619	8493
Massa volúmica (g/cm^3)	2.70	2.70	2.70
$\%D \leq 4$ microns	72	61	39
$\%D \leq 50$ microns	100	100	100

As cargas siliciosas são obtidas por mistura em diferentes proporções de duas cargas designadas por Sílica 1 e Sílica 2. O Anexo 2 apresenta as curvas granulométricas das diferentes misturas.

A escolha das cargas com granulometrias comparáveis fez-se por simples sobreposição das curvas obtidas. Os Quadros 7.2 e 7.3 dão essas dosagens e algumas das suas características.

As relações de comparação entre as cargas calcárias e siliciosas são dadas da forma seguinte:

Sílica Ultrafina	65% Sílica 1 35% Sílica 2	Calcário ultrafino	80% Calcário 1 20% Calcário 2
Sílica fina	50% Sílica 1 50% Sílica 2	Calcário fino	65% Calcário 1 35% Calcário 2
Sílica média	20% Sílica 1 80% Sílica 2	Calcário médio	20% Calcário 1 80% Calcário 2

As superfícies específicas das cargas minerais foram comunicadas pelos fornecedores.

As massas volúmicas foram determinadas com o volumenómetro de "Le Chatelier".

7.2.2.3 Cinética de polimerização

Troncy [12] realizou ensaios para determinar a influência da adição de cargas ao polímero puro sobre a cinética de polimerização. O ensaio consiste em aplicar o epóxido sobre uma superfície de vidro e determinar de 15 em 15 minutos a força necessária para arrancar uma placa de aço de 2 cm de diâmetro, inserida na cola.

Foi estudado o Epóxido Y puro e com cargas. Os resultados apresentam-se sob a forma de curvas que representam a variação da força de arrancamento em função do tempo (Figs. 7.4 a 7.7). Estudaram-se duas dosagens de carga, 375 000 cm^2 e 750 000 cm^2 de superfícies totais.

Força de arrancamento função do tempo de polimerização

S=375 000cm^2

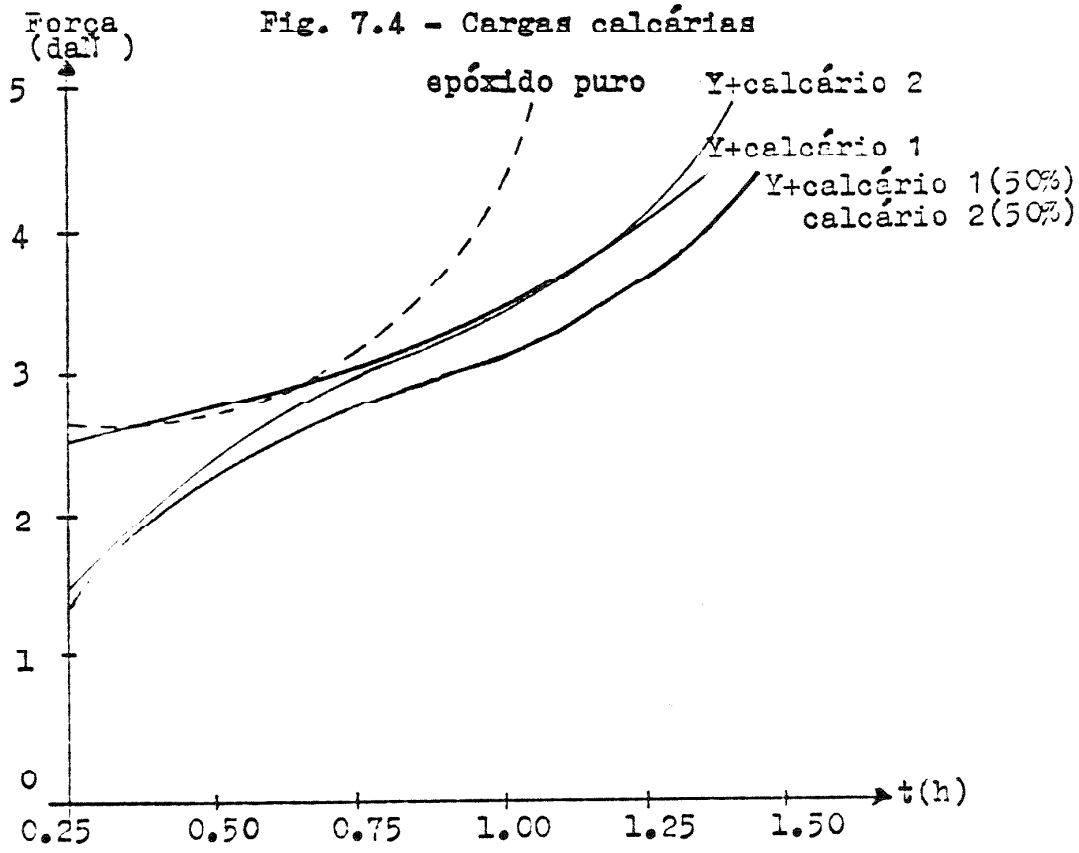


Fig. 7.4 - Cargas calcárias

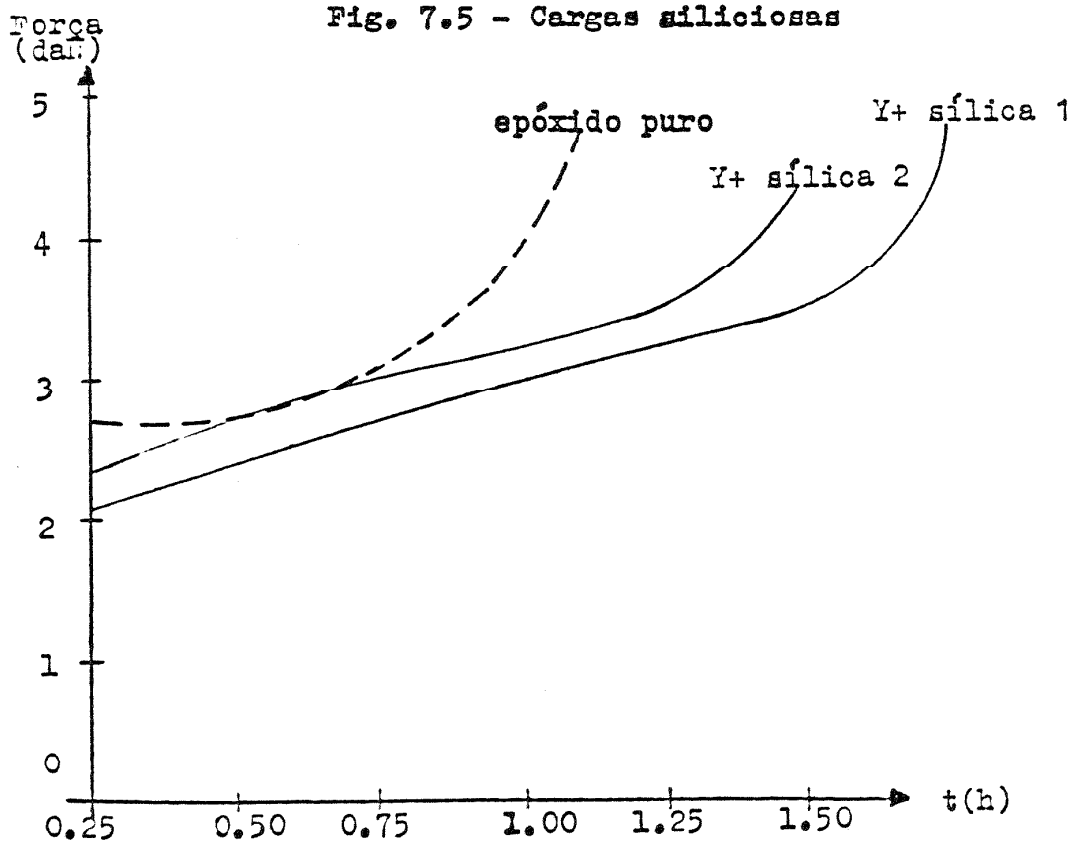


Fig. 7.5 - Cargas siliciosas

Força de arrancamento função do tempo de polimerização

S= 750 000cm^2

Fig. 7.6 - Cargas calcárias

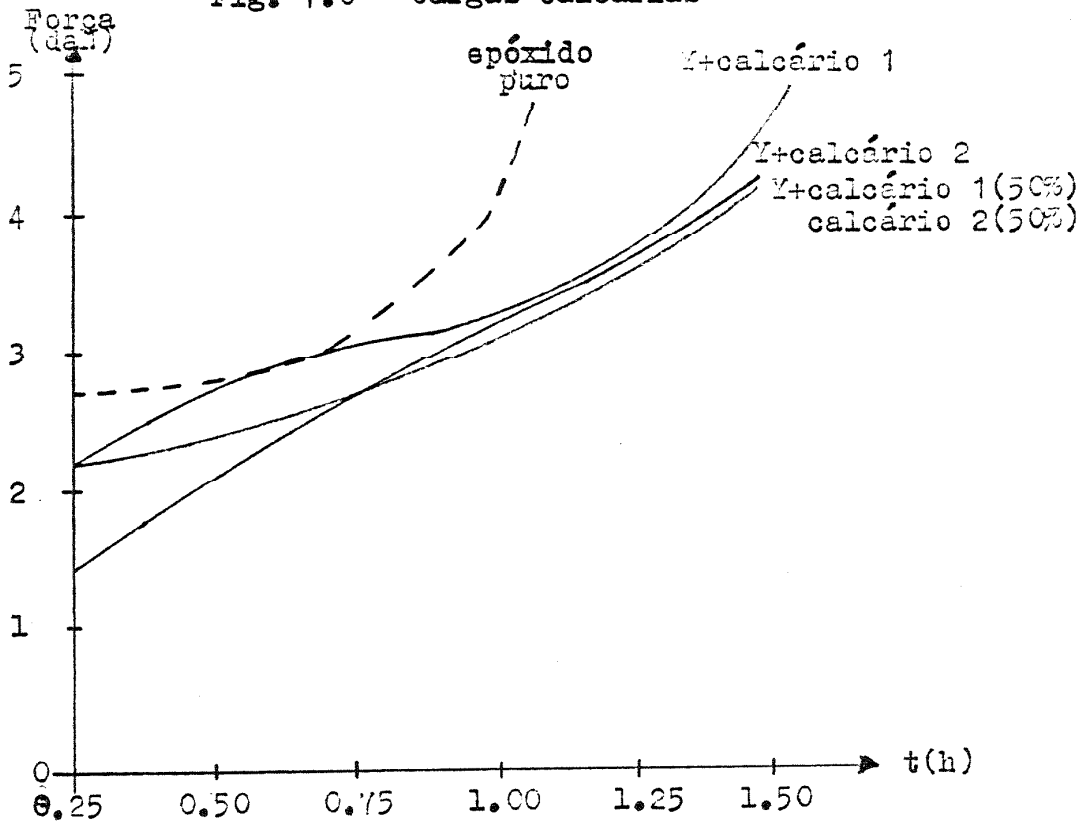
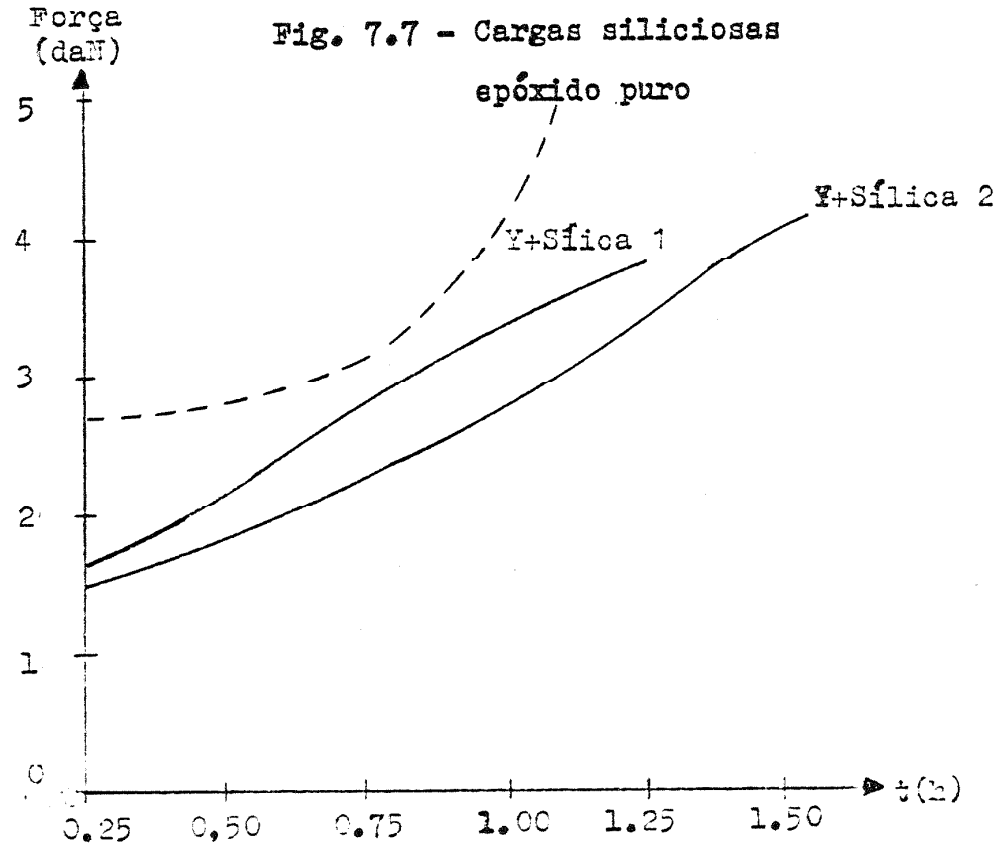


Fig. 7.7 - Cargas siliciosas



A análise das curvas apresentadas mostra que a adição de cargas provoca, em geral, um abrandamento do processo de polimerização. Isto, explica-se porque para um mesmo volume a adição de cargas reduz a quantidade de ligante. Existem, pois, menos ligações para as reacções e como consequência, o calor desenvolvido no decurso da polimerização é menor. A autoactivação da reacção é inferior.

Interessa-nos mais o tempo de fim de polimerização (tempo ao fim do qual a força de arrancamento na origem, 15 minutos, aumenta de $3\,daN$) do que o tempo convencional de início de polmerização (tempo ao fim do qual a força de arrancamento na origem, 15 minutos, aumenta de $0,5\,daN$). Verifica-se (Figs. 7.4. a 7.7) que qualquer que seja a natureza da carga o tempo de fim de polimerização é superior para os epóxidos com cargas.

O tempo de fim de polimerização é de cerca de 65 minutos para o epóxido Y puro e varia entre 85 e 95 minutos para os polímeros com cargas calcárias e entre 75 e 105 minutos para os epóxidos com cargas siliciosas. Esse tempo depende da quantidade de carga e da sua granulometria. A influência da granulometria é mais evidente com as cargas siliciosas. A influência da quantidade de carga sobre a reacção de polimerização é praticamente nula para as cargas calcárias, mas é importante para as cargas siliciosas porque a passagem de 375 000 cm^2 para 750 000 cm^2 de dosagem altera o comportamento dos epóxidos. Para a dosagem de 375 000 cm^2 o abrandamento mais importante da reacção de polimerização obtém-se com os grãos ultrafinos (Sílica 1), quando se dobra a quantidade de carga a situação inverte-se.

7.2.2.4 Quantidade máxima de carga incorporável aos polímeros puros

7.2.2.4.1 Introdução

Durante a programação dos nossos ensaios, deparámo-nos com o problema de saber qual o limite de carga que podiamos adicionar a um dado epóxido de tal forma que o produto resultante pudesse aplicar-se sobre uma superfície de betão pelos processos correntemente utilizados (espátulas, etc). Para isso estabelecemos um ensaio para determinar a quantidade máxima de carga incorporável aos epóxidos puros. Aplicando alguns dos produtos obtidos, verificámos que os valores encontrados não conduziam a produtos aplicáveis, para isso era necessário usar uma quantidade de carga inferior. Determinámos essa quantidade para alguns dos epóxidos e generalizámos para os outros a relação encontrada entre a quantidade misturável e aplicável.

7.2.2.4.2 Técnica do ensaio

O ensaio consiste em misturar, com um misturador mecânico, 50 gramas de epóxido puro e, em seguida, adicionar quantidades, sucessivamente crescentes de carga. Determina-se a quantidade de carga que conduz a uma variação da intensidade da corrente eléctrica obtida pelo misturador, de 8 mA. As cargas são incorporadas ao ritmo de 10 gramas. O misturador utilizado tem uma frequência de 25 HZ.

7.2.2.4.3 Resultados

Os resultados dos ensaios apresentam-se nos Quadros 7.4 e 7.5 e as quantidades máximas são dadas em percentagem da massa total de polímero obtida.

QUADRO 7.4
Epóxido Y + cargas

Carga	Superfície específica (cm^2/g)	Quantidade incorporável (%)	Quantidade aplicável (%)
Calcário 2	5000	72	61
Calcário médio	17000	69	59
Calcário 1/2*	35000	64	54
Calcário fino	44000	67	57
Calcário ultrafino	53000	63	54
Calcário 1	65000	53	45
Sílica 2	5078	67	57
Sílica média	8493	63	54
Sílica fina	13619	61	52
Sílica ultrafina	16175	59	50
Sílica 1	22150	51	43
Sílica de fumo	142200	41	35
Cimento	3500	68	58

* Calcário constituído por 50% Calcário 1 + 50% Calcário 2

Determinámos, em seguida, a quantidade máxima de carga incorporável sem que o polímero deixe de ser aplicável. Essa quantidade que para simplificação designaremos por quantidade aplicável, foi determinada experimentalmente para quatro dos epóxidos (X + calcário fino, X + sílica ultrafina, Y + calcário ultrafino e Y + sílica fina). Encontrámos valores que são aproximadamente 85% da quantidade máxima incorporável. Esta relação permitiu-nos fixar as quantidades máximas aplicáveis dos restantes epóxidos (Quadros 7.4 e 7.5).

QUADRO 7.5

Epóxido X + Cargas

Carga	Superfície específica (cm^2/g)	Quantidade incorporável (%)	quantidade aplicável (%)
Calcário 2	5000	—	—
Calcário médio	17000	82	70
Calcário 1/2*	35000	—	—
Calcário fino	44000	74	63
Calcário ultrafino	53000	69	59
Calcário 1	65000	—	—
Sílica 2	5078	70	60
Sílica média	8493	68	58
Sílica fina	13619	63	54
Sílica ultrafina	16175	60	51
Sílica 1	22150	54	46
Sílica de fumo	142200	51	43
Cimento	3500	81	69

* Calcário constituído por 50% Calcário 1 + 50% Calcário 2

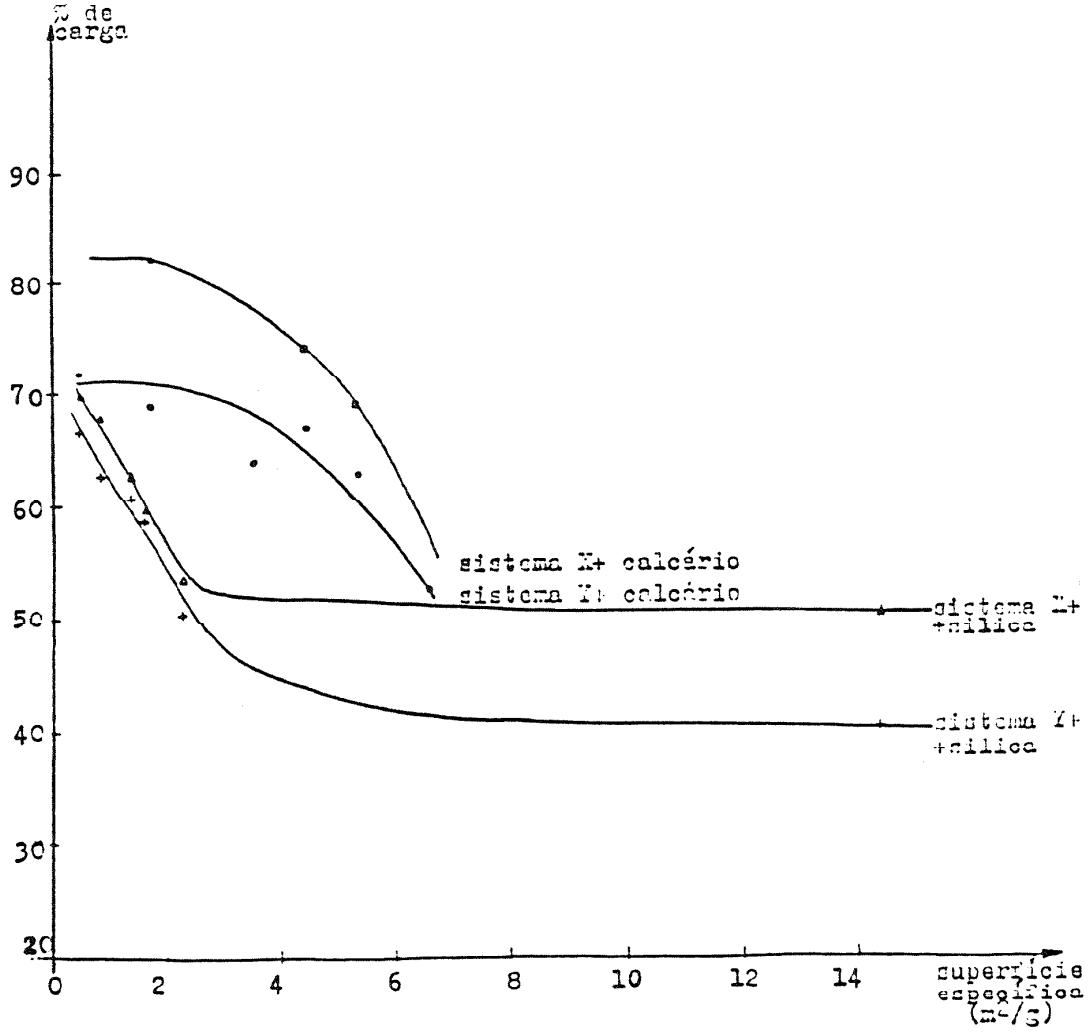


Fig. 7.8 - *Quantidade máxima de carga incorporável nos dois tipos de resinas epóxido em função da superfície específica da carga.*

A figura 7.8 representa as curvas de variação da quantidade máxima incorporável em função da superfície específica das cargas. A análise desta curva permite-nos as seguintes conclusões:

— a quantidade de carga que é possível adicionar aos epóxidos X e Y decresce à medida que a finura aumenta;

— os dois epóxidos permitem a incorporação de quantidades diferentes de carga. O Epóxido X é o que permite a maior incorporação, independentemente da natureza da carga;

— as cargas calcárias são mais incorporáveis que as cargas siliciosas independentemente do epóxido;

— os valores máximos de cargas incorporáveis são obtidos para as granulometrias médias ($S < 20\,000\ cm^2/g$). Cerca de 80% para o epóxido X e 70% para o epóxido Y com carga calcária e, aproximadamente, 70% para a carga siliciosa, qualquer que seja o epóxido utilizado;

— com cargas siliciosas de superfície específica superior a $38\,000\ cm^2/g$, o teor máximo de carga é sempre da ordem dos 50% para o polímero X. Em relação ao epóxido Y a estabilidde situa-se nos 40% para cargas siliciosas com $S \geq 60\,000\ cm^2/g$.

7.2.2.5 Influência da carga mineral no comportamento do polímero

7.2.2.5.1 Técnica do ensaio

A presença de uma carga mineral altera entre outras as seguintes propriedades: tixotropia, módulo de elasticidade, coeficiente de dilatação térmica linear, retracção, fluência e exotermia. R. Lamouri [11] estudou a forma como variam algumas destas propriedades, pela nossa parte interessámo-nos pelo estudo da influência sobre a resistência à tracção. Para isso realizámos ensaios em que ao epóxido Y foram adicionadas percentagens diferentes de calcário ultrafino e moldados provetes com a forma da figura 7.9. Estes provetes foram ensaiados à tracção numa máquina apropriada, ao fim de 7 dias com uma velocidade de $10\,N.s-1$.

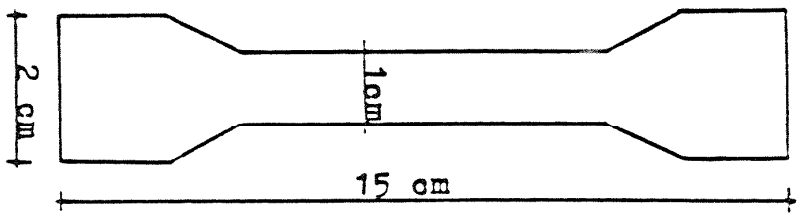


Fig. 7.9 - *Dimensões dos provetes*

7.2.2.5.2 Resultados

Os resultados obtidos apresentam-se na figura 7.10. Verifica-se que para o polímero estudado a quantidade de carga mineral não tem influência sobre a resistência à tracção.

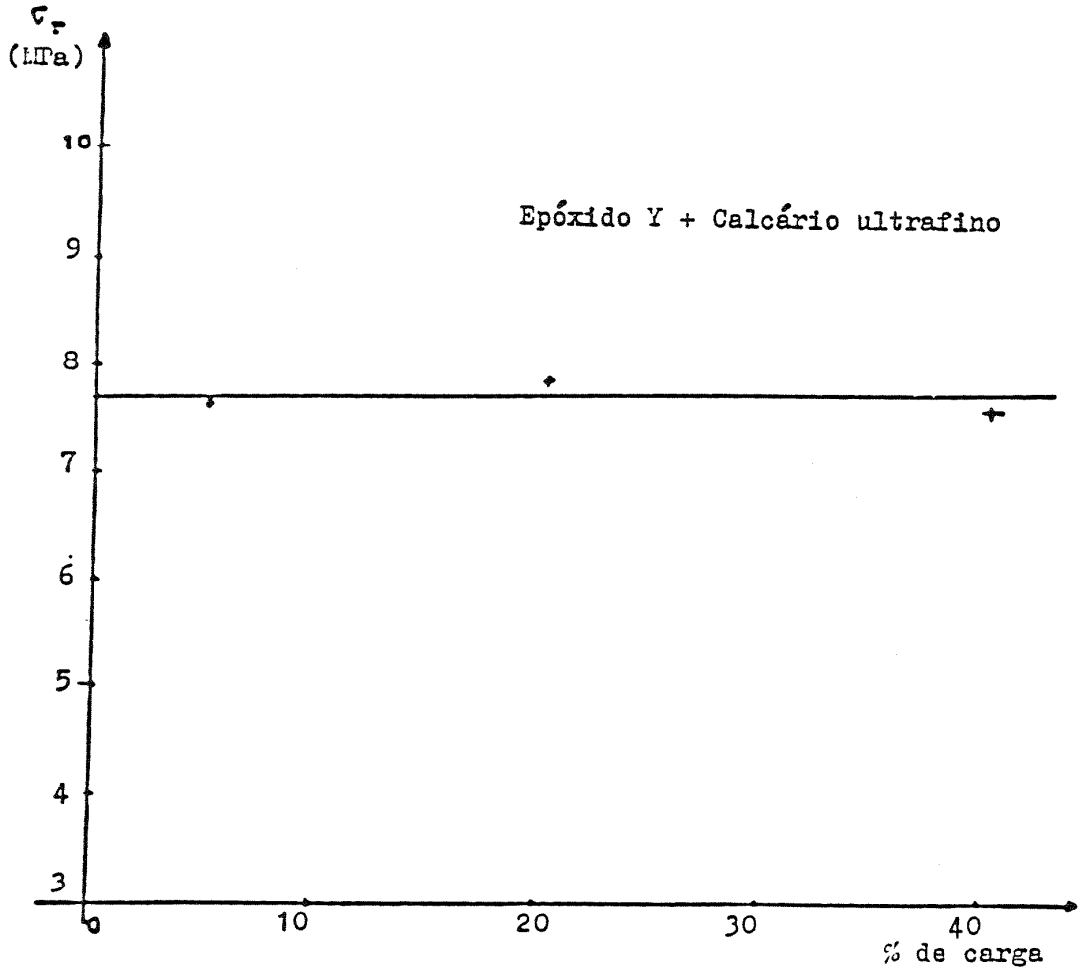


Fig. 7.10 - *Resistência à tracção em função da dosagem de carga.*

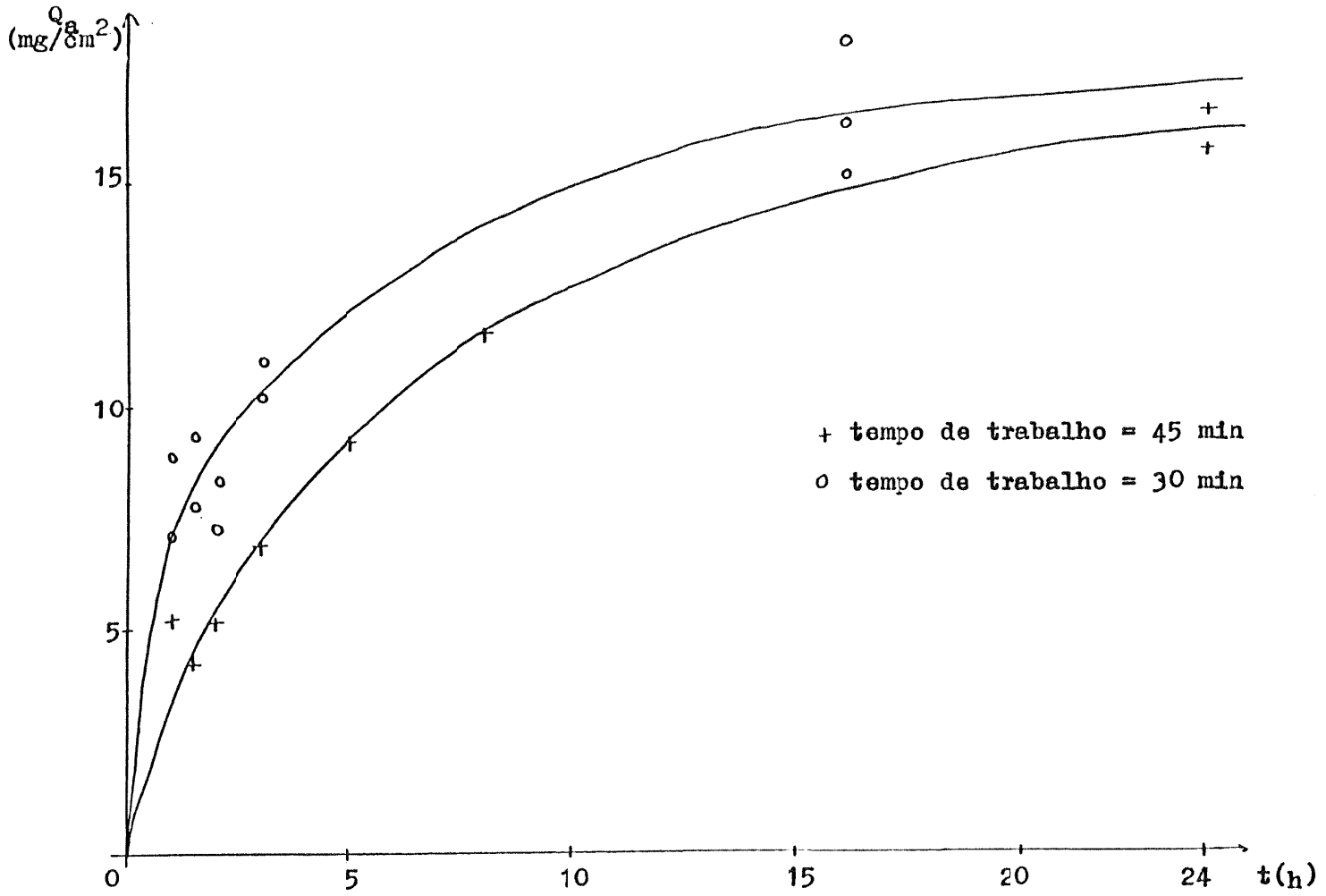


Fig. 7.11 - *Quantidade de água absorvida em função do tempo de contacto com a água e do tempo de trabalho.*

7.2.2.6 Influência da quantidade de água absorvida na resistência à tracção

O mesmo tipo de provetes utilizado no número anterior serviu para determinar a influência da quantidade de água absorvida pelo polímero na sua resistência à tracção.

Para se obterem diferentes quantidades de água absorvida os polímeros foram deixados em contacto com a água durante intervalos de tempo diferentes. A figura 7.11 dá-nos a quantidade de água absorvida em função do tempo de contacto com a água. O tempo de trabalho é o intervalo de tempo que decorre entre a mistura dos componentes e a colocação do polímero em contacto com a água. A quantidade de água absorvida é avaliada pela diferença de massas após e antes do contacto com a água.

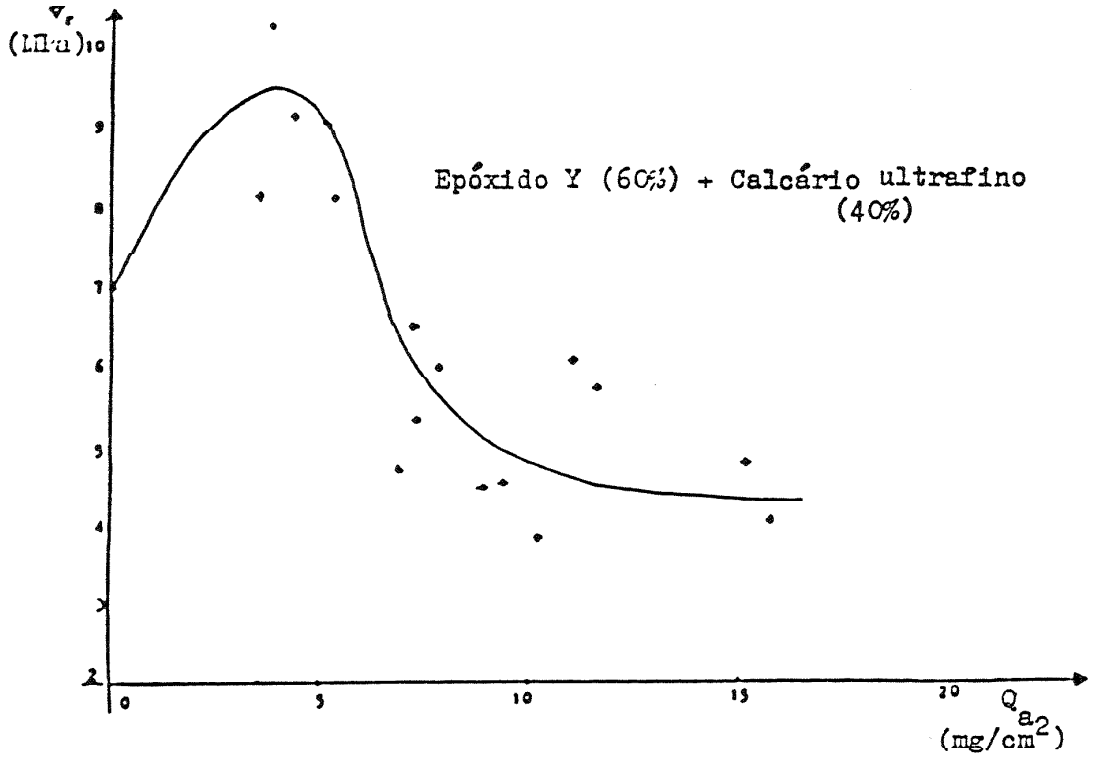


Fig. 7.12 - *Resistência à tracção em função da quantidade de água absorvida*

A resistência à tracção em função da quantidade de água absorvida apresenta-se na figura 7.12 para o Epóxido Y (60%) + Calcário Ultrafino (40%). Verifica-se que a água não perturba o polímero até $Q_a = 6\ mg/cm^2$. Se ultrapassarmos este valor a resistência à tracção baixa consideravelmente. Para pequenas quantidades de água

absorvida, até 5 mg/cm^2, a resistência à tracção é mesmo superior à do polímero sem água absorvida. Este efeito benéfico deve-se à redução das trocas de calor com o exterior que permite um endurecimento mais lento e reduz as fissuras devidas à retracção.

7.3 Avaliação da resistência das ligações betão / epóxido com ensaios de tracção directa

7.3.1 Introdução

Neste número, trataremos da análise das ligações por colagem entre betão húmido e os epóxidos que caracterizámos no número anterior. A aderência betão / epóxido será determinada através de ensaios de tracção directa. Registámos em cada ensaio a carga máxima e o modo de rotura.

Quatro modos de rotura podem surgir quando da solicitação por tracção directa de uma junta topo a topo betão / epóxido (Fig. 7.13).

A rotura deste tipo de juntas topo a topo pode dar-se no betão (tipo I), no betão e na interface ao mesmo tempo (tipo II.1 se a área de descolamento é inferior a 50% da secção total da colagem ou tipo II.2 se a área de descolamento é superior a 50% da secção total de colagem), na interface (tipo III) ou na massa da cola (tipo IV).

Os parâmetros que intervêm sobre os modos de rotura são [155]:

— o estado superficial do suporte betão;

— a porosidade da superfície do betão;

— o estado de polimento dos inertes;

— a humidade superficial do betão no momento da colagem;

— a natureza da cola;

— a composição da cola;

— a espessura da junta;

— a forma de aplicar a cola e de a repartir sobre o aderente;

— o alinhamento do provete em relação ao eixo da prensa de ensaio.

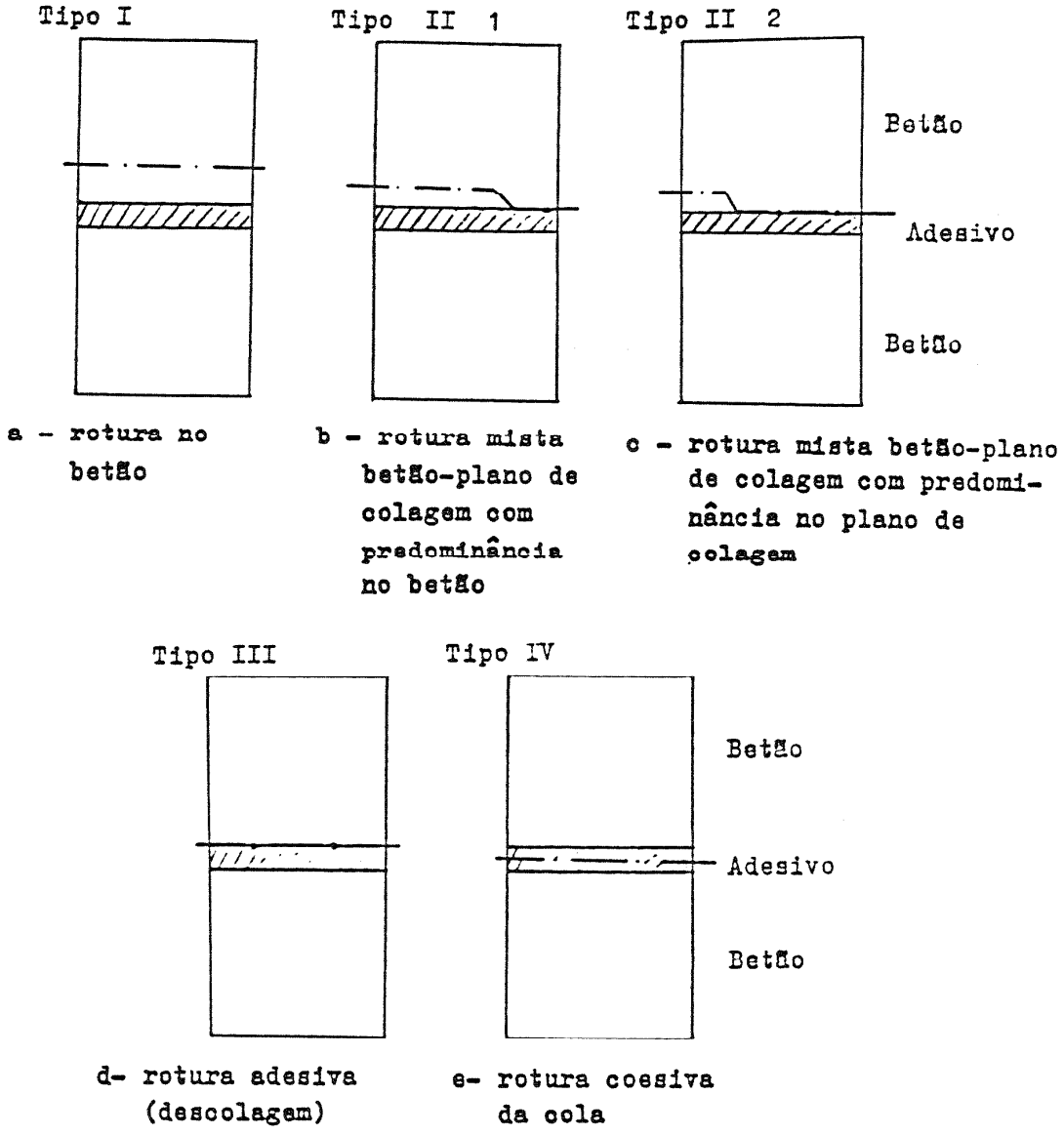


Fig. 7.13 - *Diferentes tipos de rotura de uma junta topo a topo betão / adesivo*

Esta lista de parâmetros mostra bem as dificuldades que se deparam quando se tenta estudar este tipo de ligações.

7.3.2 Escolha do ensaio

Escolhemos o ensaio de tracção directa, embora este processo de determinação da aderência esteja sujeito a algumas críticas, entre as quais a influência da geometria dos provetes e a elevada dispersão de resultados a que por vezes somos conduzidos. Posteriormente, utilizaremos um outro ensaio, baseado nos princípios da mecânica da fractura. Entretanto tendo em conta a simplicidade dos ensaios de tracção directa efectuámos alguns ensaios deste tipo.

Para cada colagem, ensaiámos três provetes cilíndricos (Fig. 7.14). As dimensões dos provetes foram fixadas em $\phi = 8\ cm$ e $h = 16\ cm$.

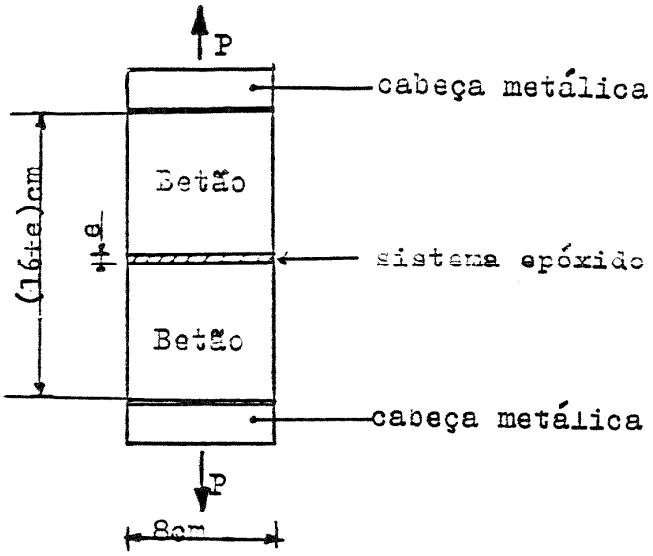


Fig. 7.14 - *Provete cilíndrico betão / cola / betão*

O betão utilizado é o definido na norma francesa NFP 18 409. A sua composição para um metro cúbico de betão é a seguinte:

- Godo 10/20.....700Kg
- Godo 4/10.....375Kg
- Areia 1/4.....255Kg
- Areia 0/1.....510Kg

- Cimento $CPA\,350..350Kg$
- Água .....$175lt.$

Este betão ensaiado à tracção directa apresenta um comportamento linear ao longo de quase toda a curva tensões - deformações, com:

- extensão à rotura: $\varepsilon_{rp} \simeq 10^{-4}$
- módulo de elasticidade na origem: $E_0 = 30$ a $35\ GPa$
- tensão de rotura à tracção: $\sigma_{rp} \simeq 2,6\ MPa$

7.3.3 Técnicas de ensaio

7.3.3.1 Preparação das superfícies

O estado das superfícies do betão é sempre "escovado". As superfícies escovadas obtêm-se de prismas $14\times30\times10\,(h)\ cm^3$, cujas superfícies resultam da desmoldagem. Para obtermos uma superfície sem leitada, as superfícies destinadas às colagens são escovadas com uma escova de cerdas rijas e em seguida varridas com um jacto de ar comprimido. São conservadas dentro de água, a uma temperatura de $20 \pm 1°C$, até à data da colagem (Fig. 7.15).

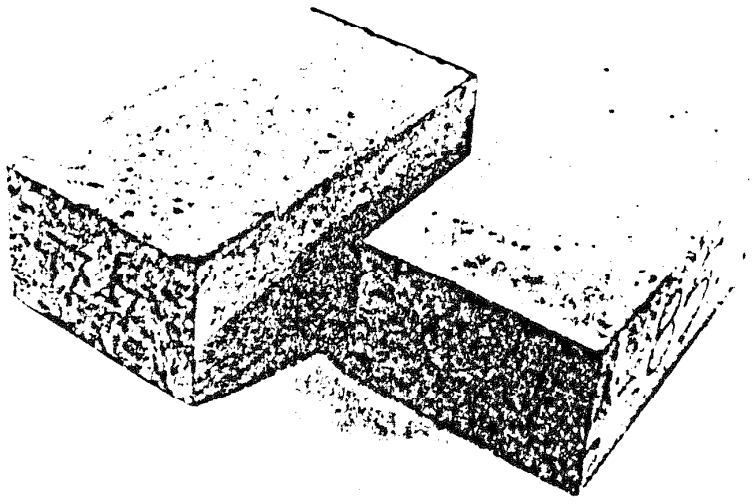


Fig. 7.15 - *Superfície escovada antes da colagem*

7.3.3.2 Processo de colagem

Para se obter uma representação correcta das condições de colagem, relativas à humidade na superfície do suporte, os prismas são retirados da água, exactamente no momento da colagem. São limpos, superficialmente, com uma esponja húmida isenta de sujidades.

A superfície dos prismas é coberta, cuidadosamente, com uma camada de cola de epóxido, com o auxílio de uma espátula. Passado o tempo de espera necessário (45 minutos para o epóxido X e 10 minutos para o epóxido Y), procedemos à união dos dois prismas. A utilização de pequenas placas metálicas, com espessura igual à desejada para a colagem, permite a obtenção dessa espessura, sem termos necessidade de calcular a massa exacta de epóxido a aplicar. Devem mesmo, aplicar-se quantidades de epóxido excedentes que com o peso do prisma superior e das cargas suplementares, sairão pelos bordos. As colagens são carregadas durante 24 horas para uma melhor molhagem do suporte betão (Fig. 7.16).

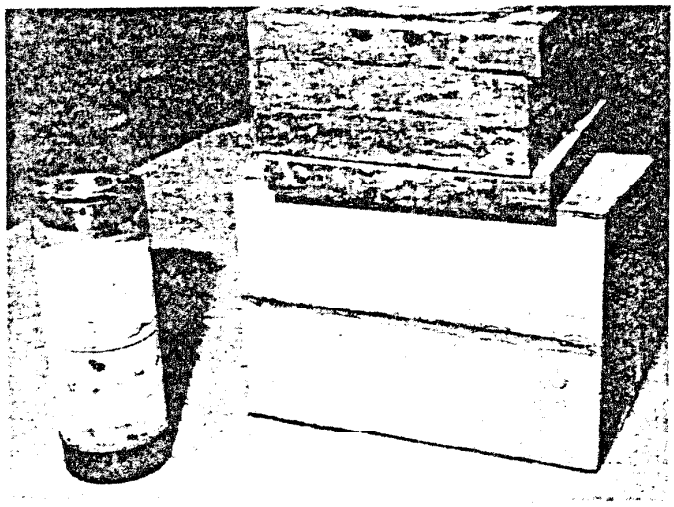


Fig. 7.16 - *Colagem dos prismas*

7.3.3.3 Ensaio de tracção directa

Sete dias após a colagem, obtemos os provetes por carotagem dos prismas $40 \times 30 \times 20\,(h)\ cm^3$, resultantes da colagem de dois prismas. As duas extremidades dos provetes são serradas para os conduzir à altura de 16 cm (Fig. 7.17).

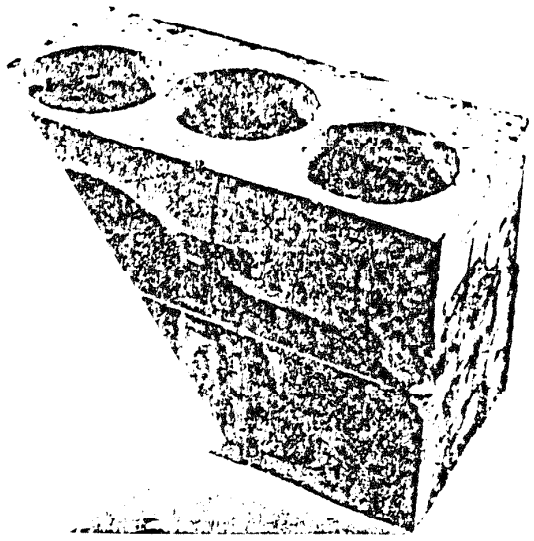


Fig. 7.17 - *Prisma carotado e um dos provetes já com a altura de* 16 *cm*

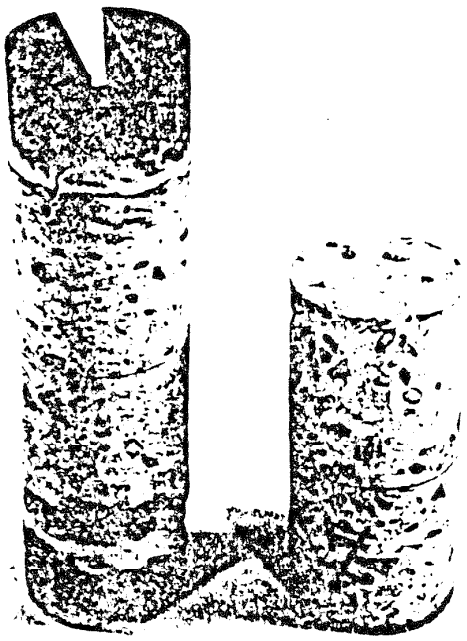


Fig. 7.18 - *Colagem das cabeças de amarração*

A obtenção dos provetes por carotagem, justifica-se porque é mais fácil reproduzir um estado de superfície sobre prismas que sobre cilindros de 8 cm de diâmetro.

Após a serragem dos provetes, colámos a cada uma das suas extremidades uma cabeça de amarração (Fig. 7.18). Sete dias após, realizámos o ensaio de tracção directa. A velocidade dos ensaios é de 4 KN/min.

7.3.4 Série de ensaios no. 1

Estes ensaios destinam-se a determinar a influência da natureza e da granulometria das cargas sobre a aderência. Escolhemos três granulometrias de cada carga, siliciosa ou calcária e fazemos variar a quantidade de carga incorporada ao polímero puro. As quantidades de carga são indicadas em percentagem da massa total do epóxido obtido (base + endurecedor + carga). Todos os ensaios são efectuados com uma espessura de 0,6 mm. Para termos a certeza, de obtermos a espessura desejada, preparámos 100 g de epóxido para cada colagem. Para cada carga e para cada polímero efectuámos os ensaios necessários para bem definir a curva de variação da aderência em função da percentagem de carga mineral adicionada ao sistema.

Os resultados dos ensaios apresentam-se nos quadros seguintes:

- Epóxido X + Sílica — Quadro 7.6
- Epóxido X + Calcário — Quadro 7.7
- Epóxido Y + Sílica — Quadro 7.8
- Epóxido Y + Calcário — Quadro 7.9

7.3.5 Série de ensaios no. 2

Estes ensaios destinam-se a determinar a influência da espessura sobre a aderência. Só utilizámos um dos epóxidos, o Y. As cargas utilizadas são: sílica de fumo (10% e 35%), sílica 1 (10% e 20%), sílica 2 (35% e 50%), calcário 1 (10% e 45%), calcário 2 (35% e 50%) e calcário 1/2 (10% e 20%). Estas formulações foram escolhidas entre várias ensaiadas com a espessura de 1 mm porque foram as que conduziram às melhores aderências.

QUADRO 7.6

Epóxido X + Sílica

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
100	—	1.47 1.67 2.00	1.71	— Adesiva (3)
85	Sílica u 15	2.40 2.39 2.20	2.33	— Mistura adesiva (2) — Adesiva
76	Sílica u 24	2.74 2.59 2.65	2.66	— Betão — Mista betão (2)
70	Sílica u 30	2.60 2.75 2.70	2.68	— Mista betão — Betão (2)
62	Sílica u 38	2.56 2.50 2.84	2.63	— Mista betão (2) — Betão
50	Sílica u 50	2.63 2.39 2.64	2.55	— Mista betão (3)
85	Sílica f 15	2.79 2.39 2.59	2.59	— Mista betão (3)
73	Sílica f 27	2.79 2.83 2.63	2.75	— Betão (3)
65	Sílica f 35	2.54 2.99 2.86	2.80	— Mista betão — Betão (2)
58	Sílica f 42	2.13 2.28 2.48	2.30	— Adesiva (2) — Mista betão
90	Sílica m 10	2.83 2.90 2.42	2.72	— Betão (2) — Mista betão
80	Sílica m 20	3.01 3.17 3.09	3.09	— Betão (3)
63	Sílica m 37	2.00 1.70 2.82	2.17	— Adesiva (2) — Betão
46	Sílica m 54	2.04 2.01 1.94	2.00	— Adesiva (3)

Sílica u = Sílica ultrafina
Sílica f = Sílica fina
Sílica m = Sílica média

* - média dos três provetes
() - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.7

Epóxido X + Calcário

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
92.5	Calcário u 7.5	2.15 2.25 3.32	2.57	— Mista adesiva (2) — Betão
91	Calcário u 9	2.50 2.54 3.17	2.74	— Mista betão (2) — Betão
87	Calcário u 13	2.96 2.86 2.97	2.93	— Betão (3)
84	Calcário u 16	2.79 2.68 2.72	2.73	— Betão (3)
80	Calcário 20	2.41 2.51 2.10	2.34	— Mista betão (2) — Adesiva
95	Calcário f 5	2.57 2.47 2.72	2.59	— Mista betão (2) — Betão
90	Calcário f 10	2.70 2.68 2.78	2.72	— Betão (3)
81	Calcário f 19	2.73 2.90 2.83	2.82	— Betão (3)
70	Calcário f 30	2.72 1.56 1.59	1.96	— Betão — Adesiva (2)
82	Calcário m 18	2.75 2.63 2.60	2.66	— Betão — Mista betão (2)
77	Calcário m 23	2.68 2.77 2.22	2.56	— Betão (2) — Adesiva
70	Calcário 30	1.41 1.34 2.02	1.59	— Adesiva (3)
55	Calcário m 45	1.75 1.67 1.74	1.72	— Adesiva (3)

Calcário u = Calcário ultrafino
Calcário f = Calcário fino
Calcário m = Calcário médio

* - média dos três provetes
() - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.8

Epóxido Y + Sílica

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
100	—	1.60 2.12 1.80	1.84	— — Adesiva (3)
90	Sílica u 10	1.50 1.74 1.77	1.67	— Adesiva (3)
76	Sílica u 24	1.27 1.55 1.95	1.59	— Adesiva (3)
62	Sílica u 38	2.28 2.57 2.46	2.44	— Adesiva — Mista betão (2)
55	Sílica u 45	2.15 1.80 2.17	2.04	— Mista adesiva (3)
90	Sílica f 10	1.22 1.39 1.44	1.35	— Adesiva (3)
73	Sílica f 27	0.95 0.91 0.52	0.79	— Adesiva (3)
58	Sílica f 42	2.39 2.49 2.60	2.49	— Mista betão (3)
53	Sílica f 47	2.21 2.40 2.44	2.35	— Adesiva — Mista adesiva — Mista betão
98	Sílica m 10	1.20 1.60 1.52	1.44	— Adesiva (3)
63	Sílica m 37	0.99 0.88 1.04	0.97	— Adesiva (3)
52	Sílica m 48	2.13 1.70 2.11	1.98	— Adesiva (3)
46	Sílica m 54	2.56 2.52 2.33	2.49	— Mista betão (3)

Sílica u = Sílica ultrafina
Sílica f = Sílica fina
Sílica m = Sílica média

* - média dos três provetes
() - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.9

Epóxido Y + Calcário

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
95	Calcário u 5	3.40 2.72 2.79	2.97	— Betão (3)
91	Calcário u 9	2.85 2.67 2.48	2.67	— Betão (2) — Mista betão
84	Calcário u 16	2.04 2.21 1.84	2.03	— Adesiva (3)
95	Calcário f 5	2.38 2.33 2.22	2.31	— Mista adesiva (2) — Adesiva
90	Calcário f 10	2.71 2.69 2.67	2.69	— Betão (3)
81	Calcário f 19	2.70 2.73 2.69	2.71	— Betão (3)
70	Calcário f 30	2.20 2.27 2.23	2.25	— Adesiva (3)
90	Calcário m 10	0.94 0.48 0.46	0.63	— Adesiva (3)
82	Calcário m 18	1.83 2.08 2.06	1.97	— Adesiva (3)
77	Calcário m 23	2.40 2.40 2.40	2.40	— Mista betão (3)
63	Calcário m 37	1.80 1.79 1.60	1.73	— Adesiva (3)

Calcário u = Calcário ultrafino
Calcário f = Calcário fino
Calcário m = Calcário médio

* - média dos três provetes
() - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

Os ensaios foram efectuados com diferentes espessuras. A espessura mais elevada que ensaiámos foi 2 mm. As quantidades de epóxido preparadas para cada ensaio dependem da espessura desejada. Preparámos, sempre, uma quantidade que nos permita assegurar a espessura pretendida e que não haverá vazios por falta de cola. Assim, as quantidades a preparar são as seguintes:

$$
\begin{array}{rcccrcr}
 & & e & \leq & 0{,}5\ mm & - - - & 50\ g \\
0{,}5\ mm & < & e & \leq & 1\ mm & - - - & 100\ g \\
1\ mm & < & e & \leq & 1{,}5\ mm & - - - & 150\ g \\
1{,}5\ mm & < & e & \leq & 2\ mm & - - - & 200\ g
\end{array}
$$

Os resultados dos ensaios apresentam-se nos quadros seguintes:

- Epóxido Y + Sílica de fumo — Quadro 7.10
- Epóxido Y + Sílica 1 — Quadro 7.11
- Epóxido Y + Sílica 2 — Quadro 7.12
- Epóxido Y + Calcário 1 — Quadro 7.13
- Epóxido Y + Calcário 1/2 — Quadro 7.14
- Epóxido Y + Calcário 2 — Quadro 7.15

7.3.6 Série de ensaios no. 3

Para melhor definir a influência da natureza da carga sobre a aderência dos epóxidos ao suporte húmido, efectuámos ensaios introduzindo uma carga reactiva, o cimento C.P.A. 350 (equivalente ao CPN 30). Ensaiaram-se os epóxidos X e Y e o cimento foi adicionado em várias percentagens. Os resultados comparar-se-ão com os da sílica média e calcário médio, os quais têm uma superfície específica mais próxima da do cimento ($S = 3\,500\ cm^2/g$) do que a das restantes cargas utilizadas na série n^o 1.

A espessura utilizada é de $0{,}6\ mm$. Os resultados apresentam-se nos Quadros 7.16 e 7.17.

QUADRO 7.10

Epóxido Y + Sílica de fumo

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	0.2	0.65 0.49 0.60	0.58	— Adesiva (3)
90	10	1	2.76 2.95 2.93	2.88	— Betão (3)
90	10	1.6	1.11 1.19 1.94	1.65	— Adesiva (3)
80	20	1	0.90 1.01 0.88	0.93	— Adesiva (3)
65	35	0.6	1.07 1.06 0.90	1.01	— Adesiva (3)
65	35	1	1.57 1.72 1.33	1.54	— Adesiva (3)
63	35	2	0.05 0.03 0.53	0.20	— Adesiva (3)

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.11

Epóxido V + Sílica 1

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	0.6	2.32 2.68 2.55	2.55	— Mista adesiva — Mista betão (2)
90	10	1	2.94 2.65 2.85	2.81	— Betão (3)
90	10	1.6	2.19 2.14 2.27	2.20	— Adesiva (3)
80	20	0.6	2.53 2.35 2.68	2.52	— Mista betão (2) — Betão
80	20	1	2.90 2.94 3.10	2.98	— Betão (3)
80	20	1.6	2.39 2.44 2.31	2.38	— Mista betão (2) — Mista adesiva
65	35	1	1.43 0.97 1.78	1.39	— Adesiva (3)
60	40	1	2.11 1.94 2.61	2.22	— Adesiva (2) — Mista betão

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.12

Epóxido Y + Sílica 2

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	1	0.49 0.31 1.09	0.63	— Adesiva (3)
80	20	1	1.86 1.96 1.70	1.84	— Adesiva (3)
65	35	0.6	2.31 2.32 2.39	2.34	— Mista adesiva (3)
65	35	1	2.97 3.24 2.20	2.80	— Betão (2) — Adesiva
65	35	2	1.43 1.45 1.37	1.42	— Adesiva (3)
50	50	0.6	2.85 2.89 2.00	2.58	— Betão (2) — Adesiva
50	50	1	2.37 3.02 3.01	2.80	— Mista betão — Betão (2)
50	50	2	0.88 0.96 1.25	1.03	— Adesiva (3)
45	55	1	2.56 2.71 2.63	2.63	— Mista betão — Betão (2)

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.13

Epóxido Y + Calcário 1

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	0.6	1.34 1.48 1.75	1.52	— Adesiva (3)
90	10	1	1.88 2.06 2.15	2.03	— Adesiva (3)
90	10	2	2.83 2.91 2.57	2.77	— Betão (2) — Mista betão
80	20	1	0.97 1.15 1.22	1.11	— Adesiva (3)
65	35	1	1.32 1.36 1.55	1.41	— Adesiva (3)
55	45	0.2	1.94 1.81 1.44	1.73	— Adesiva (3)
55	45	1	2.76 2.86 2.87	2.83	— Betão (3)
55	45	1.6	2.82 3.12 3.03	2.99	— Betão (3)

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.14

Epóxido Y + Calcário 1/2

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	0.1	2.82 3.59 3.21	3.21	— Betão (3)
90	10	0.6	3.61 3.12 3.60	3.44	— Betão (3)
90	10	1	3.30 3.47 3.25	3.34	— Betão (3)
80	20	0.1	2.69 2.80 2.75	2.75	— Betão (3)
80	20	0.6	2.76 3.13 3.14	3.01	— Betão (3)
80	20	1	2.99 3.11 2.84	2.98	— Betão (3)
65	35	1	0.77 1.98 1.90	1.55	— Adesiva (3)
45	55	1	2.44 2.08 1.80	2.11	— Mista adesiva — Adesiva (2)

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.15

Epóxido Y + Calcário 2

Epóxido (%)	Carga (%)	Espessura (mm)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	1	1.07 1.50 0.25	0.94	— Adesiva (3)
80	20	1	0.94 1.33 2.65	1.64	— Adesiva (2) — Mista betão
65	35	0.6	1.60 1.58 2.22	1.80	— Adesiva (3)
65	35	1	1.95 2.36 2.36	2.22	— Adesiva — Mista adesiva (2)
65	35	1.6	2.83 2.70 2.93	2.82	— Betão (3)
50	50	0.6	2.07 1.69 2.37	2.04	— Adesiva (3)
50	50	1	2.45 2.40 2.80	2.55	— Mista betão (2) — Betão
50	50	1.6	2.88 2.85 3.21	2.98	— Betão (3)
40	60	1	2.25 1.88 2.21	2.11	— Adesiva (3)

* - média dos três provetes

( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.16

Epóxido X + Cimento

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	2.78 2.69 2.86	2.78	— Betão (3)
80	20	2.53 2.61 3.09	2.74	— Mista betão (2) — Betão
65	35	2.40 2.61 2.28	2.43	— Mista betão (2) — Adesiva
44	56	2.15 1.98 1.83	1.99	— Adesiva (3)

* - média dos três provetes
( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

QUADRO 7.17

Epóxido Y + Cimento

Epóxido (%)	Carga (%)	Tensão de rotura σ_r (MPa)	σ_r^* (MPa)	Tipo de rotura
90	10	2.80 2.68 2.65	2.71	— Betão (3)
80	20	2.75 2.68 2.36	2.60	— Betão (2) — Adesiva
65	35	2.37 2.45 2.50	2.44	— Mista adesiva — Mista betão (2)
44	56	2.45 2.49 2.00	2.31	— Adesiva (3)

* - média dos três provetes
( ) - número de provetes com o mesmo tipo de rotura

7.3.7 Modos de rotura

Os principais tipos de rotura que registámos no decurso dos nossos ensaios representam-se na figura 7.19.

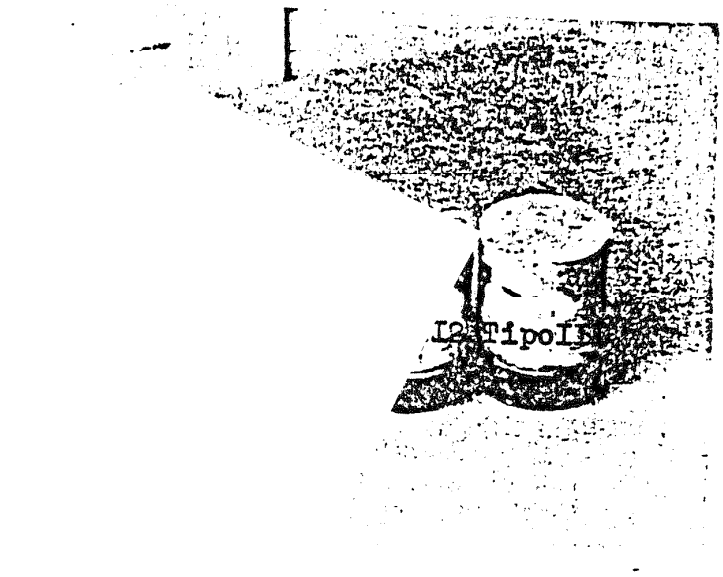


Fig. 7.19 - *Principais tipos de rotura dos provetes betão-cola-betão*

As roturas do tipo I surgem na massa do betão entre a junta e a parte inferior ou superior do provete. As juntas de colagem ficam, sempre, intactas.

Consideramos roturas mistas com predominância no betão (tipo II.1) quando a superfície total de descolagem não ultrapassa 50% da secção total da colagem e roturas mistas com predominância na interface (tipo II.2) quando a superfície de descolagem ultrapassa 50% da secção de colagem.

As roturas do tipo III que têm lugar na interface betão - epóxido são por vezes acompanhadas de pequenas zonas, insignificantes, de descolagem da leitada superficial do betão.

7.3.8 Resultados

7.3.8.1 Série de ensaios no. 1

Verifica-se (Figs. 7.20 e 7.21) que existe uma dosagem óptima de carga conduzindo a um máximo de resistência e de aderência. Este óptimo varia segundo a

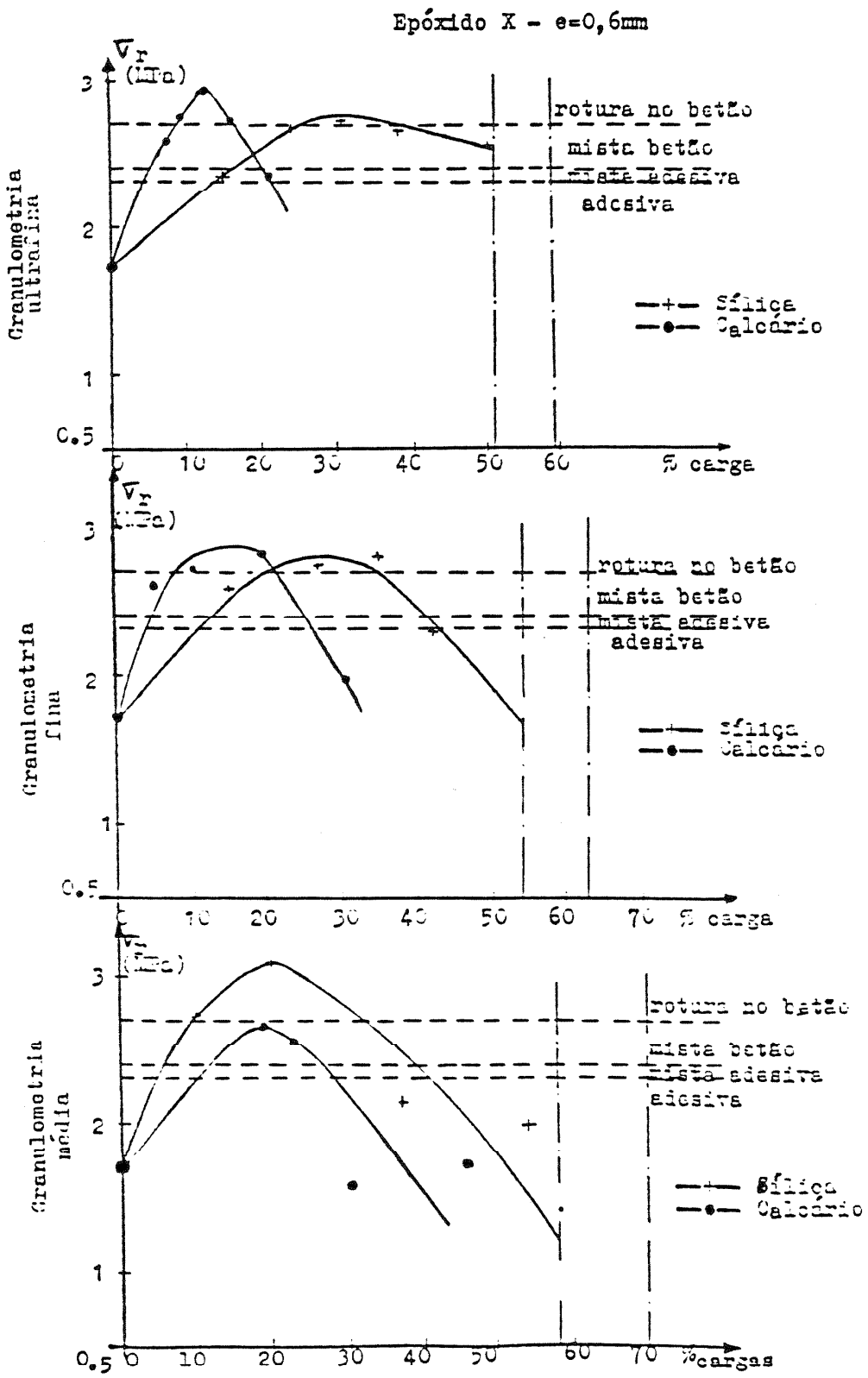


Fig. 7.20 - *Aderência em função da percentagem de carga.*

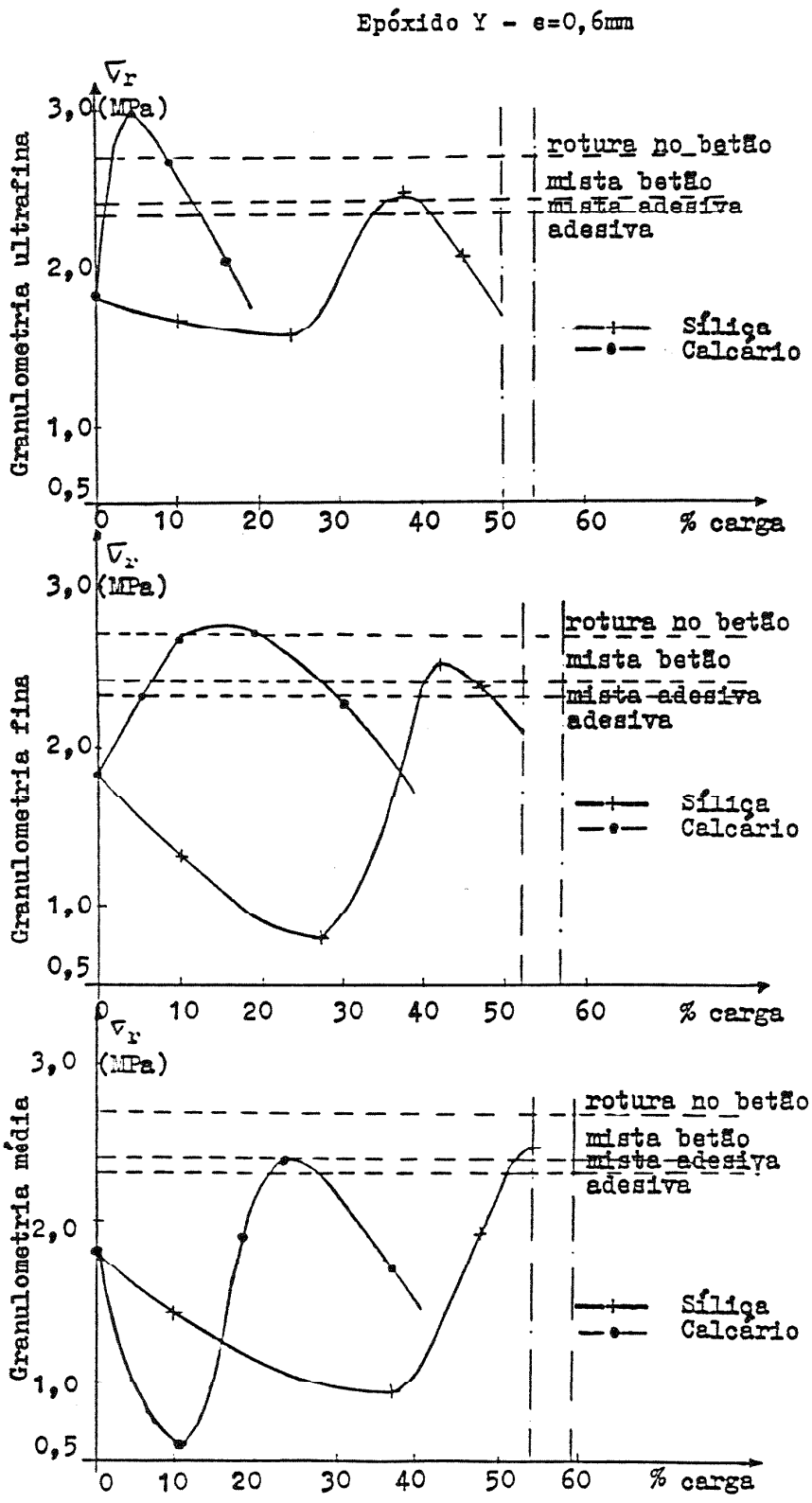


Fig. 7.21 - *Aderência em função da percentagem de carga.*

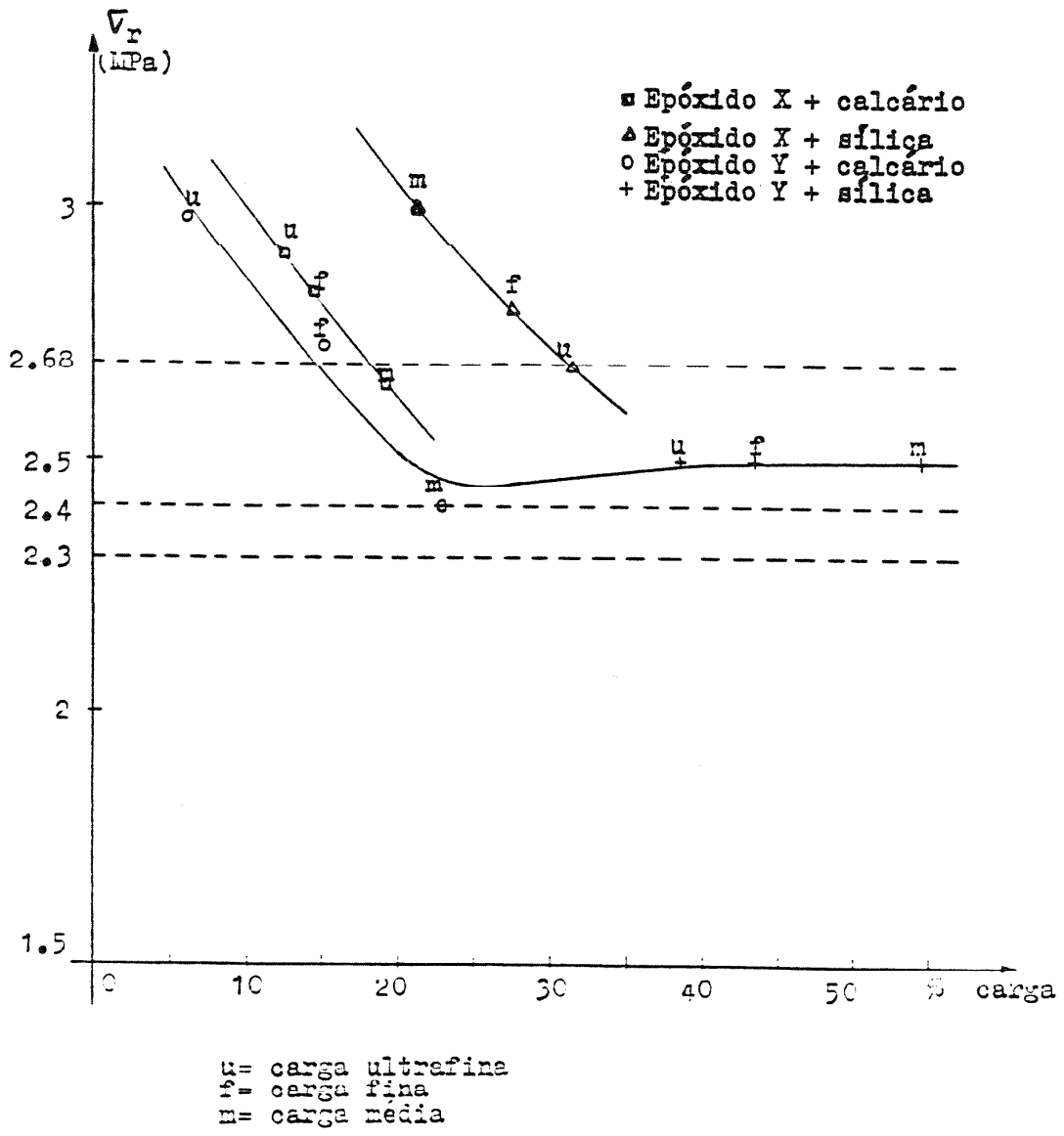


Fig. 7.22 - *Tensões de rotura máximas em função da dosagem de carga*

natureza da carga, a sua granulometria e o epóxido experimentado. Para o epóxido *X* obtêm-se bons resultados, quer com cargas calcárias, quer com siliciosas. O comportamento é semelhante, qualquer que seja a granulometria, mas as percentagens

óptimas, do ponto de vista da aderência, estão compreendidas entre 12 e 18% para o calcário e entre 20 e 30% para a sílica. Para o epóxido Y, os melhores resultados (rotura no betão) obtêm-se com a carga calcária fina e ultrafina em dosagens compreendidas entre 5 e 14%. Estes resultados estão sintetizados na figura 7.22 onde se pode verificar que as tensões máximas, conduzindo a rotura no betão, registadas com o epóxido X, têm lugar indiferentemente com cargas calcárias ou siliciosas com uma tendência a melhores valores no caso dos elementos médios siliciosos e ultrafinos e finos calcários. Com o epóxido Y os valores das aderências óptimas decrescem à medida que a dimensão dos grãos calcários aumenta. As cargas siliciosas conduzem, qualquer que seja a sua granulometria, a roturas mistas com tensões da ordem de $2,50\ MPa$.

Estes resultados confirmam, portanto, a existência de uma relação óptima polímero - carga e a aderência parece ser função, entre outras, da natureza e da granulometria da carga.

7.3.8.2 Série de ensaios no. 2

O comportamento das cargas parece ser diferente (Figs. 7.23 e 7.24). Enquanto que com as cargas calcárias a aderência aumenta com a espessura, com as cargas siliciosas a aderência atinge os valores máximos (roturas no betão) para espessuras entre $0,7$ e $1,3\ mm$. A aderência aumenta com a espessura, para espessuras inferiores a $1\ mm$ e decresce à medida que a espessura aumenta, para espessuras superiores a $1\ mm$.

O calcário $1/2$ é a carga que conduz aos melhores resultados, roturas no betão, mesmo para a espessura de $0,1\ mm$ e nas duas dosagens ensaiadas (10 e 20%). Com o calcário 2 obtêm-se roturas no betão se a espessura da junta for superior a $1,2\ mm$ para uma dosagem de 50% e a $1,5\ mm$ para uma dosagem de 35%. As espessuras a partir das quais começamos a obter roturas no betão, com a carga calcário 1, são $0,9\ mm$ com uma dosagem de 45% e $1,5\ mm$ com uma dosagem de 10%.

Em relação às cargas siliciosas a formulação que apresenta um intervalo maior de espessuras, correspondentes a rotura no betão, é a formulação com 20% de sílica 1, com espessuras óptimas compreendidas entre $0,7$ e $1,3\ mm$. A mesma sílica, mas numa dosagem de 10%, conduz a uma diminuição da amplitude desse intervalo para $0,4\ mm$ ou seja entre $0,8$ e $1,2\ mm$. Com as outras sílicas os intervalos são menores e há mesmo formulações com as quais não foi possível obter roturas no betão. Para uma dosagem de 35% de sílica de fumo, a rotura é sempre adesiva e a tensão máxima é da ordem dos $1,50\ MPa$.

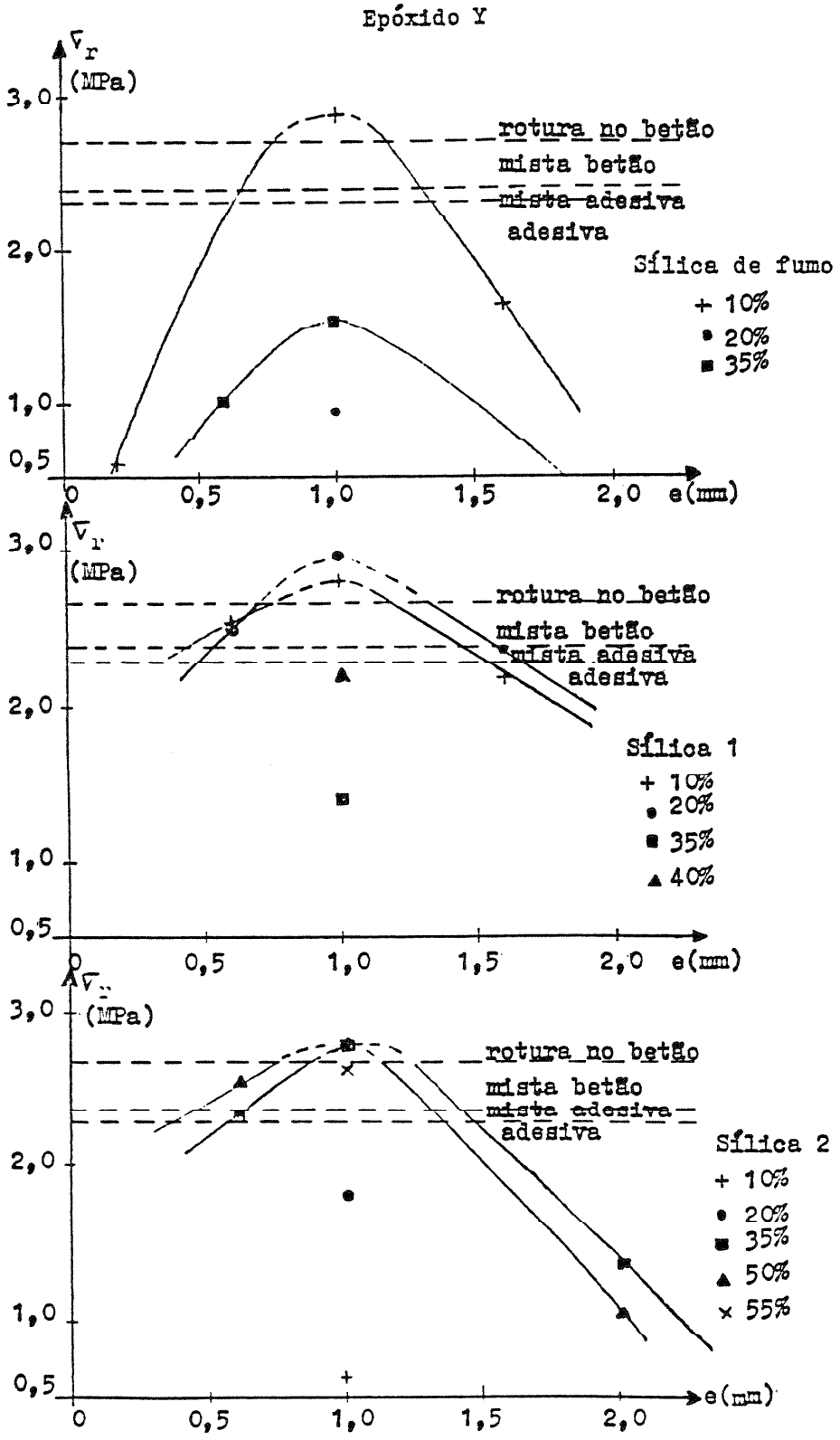


Fig. 7.23 - *Aderência em função da espessura da junta.*

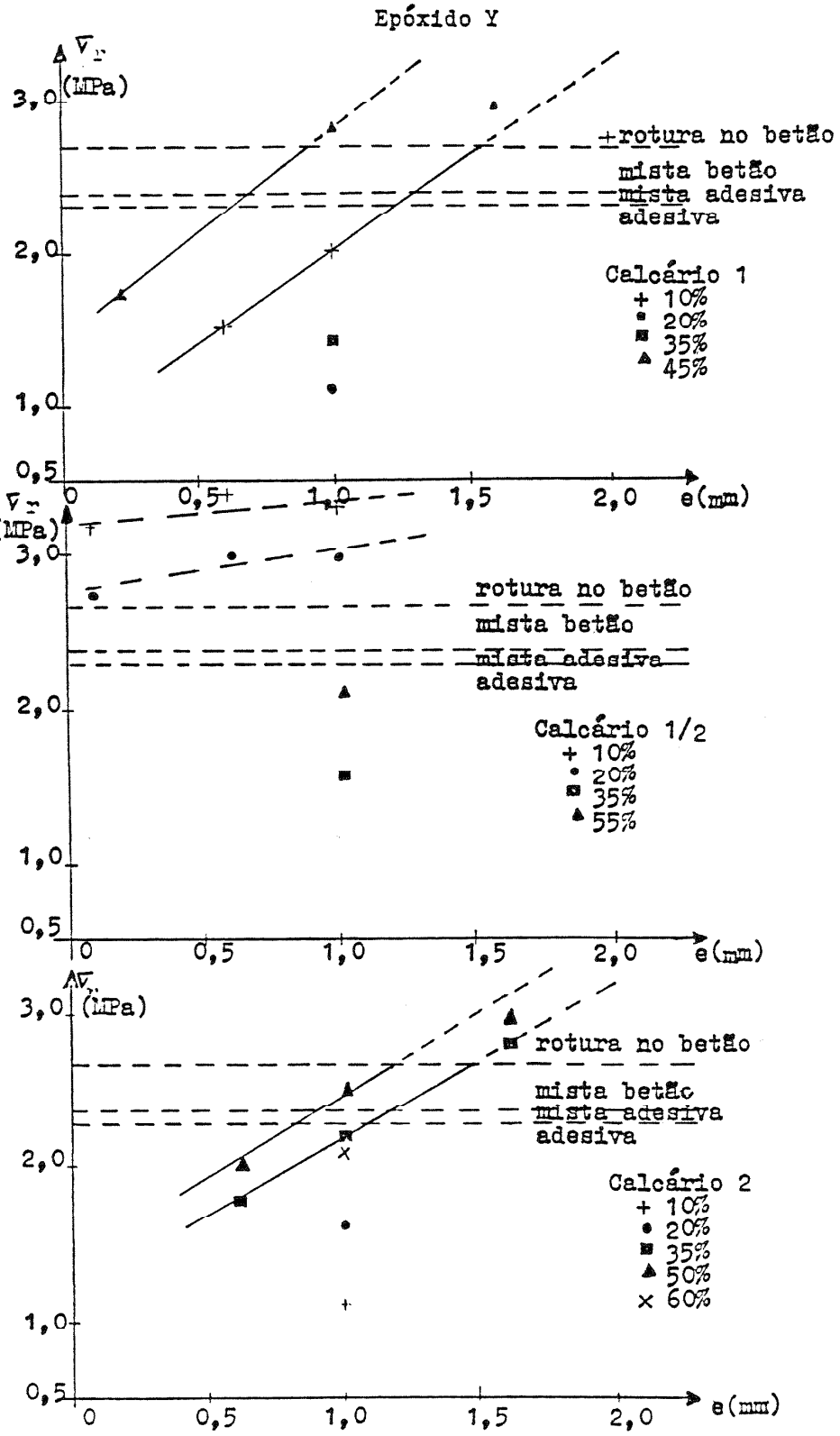


Fig. 7.24 - *Aderência em função da espessura da junta.*

Estes resultados conduzem, portanto, à existência de uma espessura mínima a partir da qual as roturas têm lugar no betão, para as cargas calcárias. Se a carga é siliciosa o dimensionamento da junta de colagem tem que ser mais cuidadoso porque a rotura no betão não acontece sempre, para espessuras superiores à mínima. Existe um limite máximo, a partir do qual a aderência diminui, significativamente.

7.3.8.3 Série de ensaios no. 3

A utilização de uma carga não inerte (Figs. 7.25 e 7.26) melhora o comportamento do epóxido Y e conduz a melhores resultados que a carga calcária de granulometria média com o epóxido X. A dosagem óptima de cimento é de 15% para o epóxido X e de 10% para o epóxido Y. Com as cargas inertes as dosagens óptimas variam entre 18 e 23% para o calcário e entre 20 e 45% para a sílica.

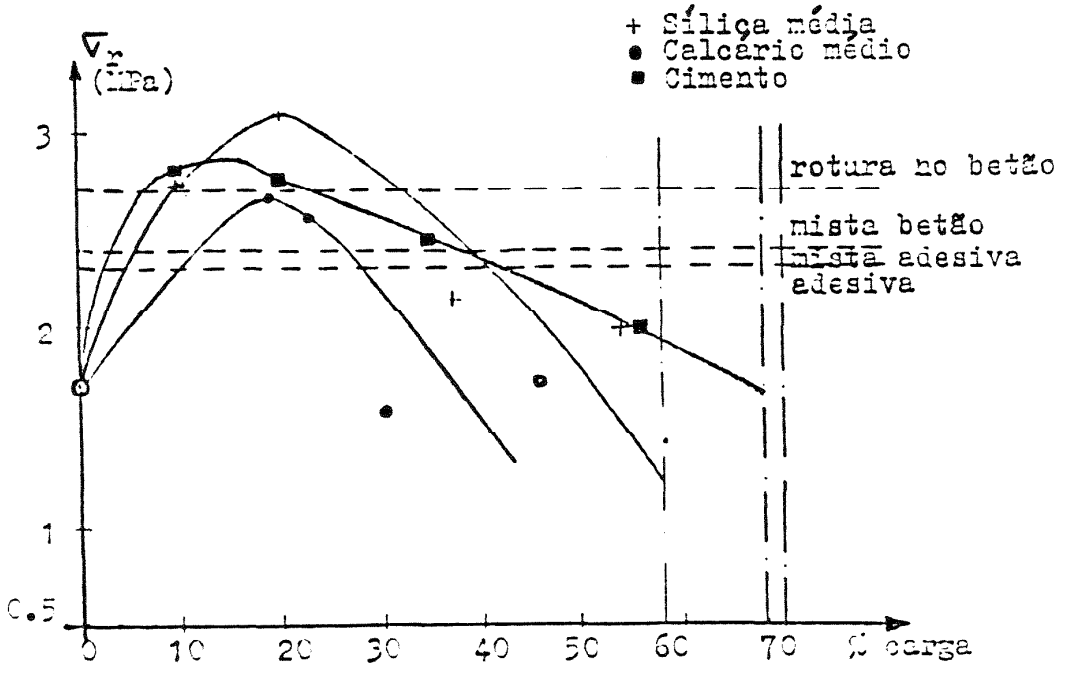


Fig. 7.25 - *Aderência em função da dosagem de carga - Epóxido X*

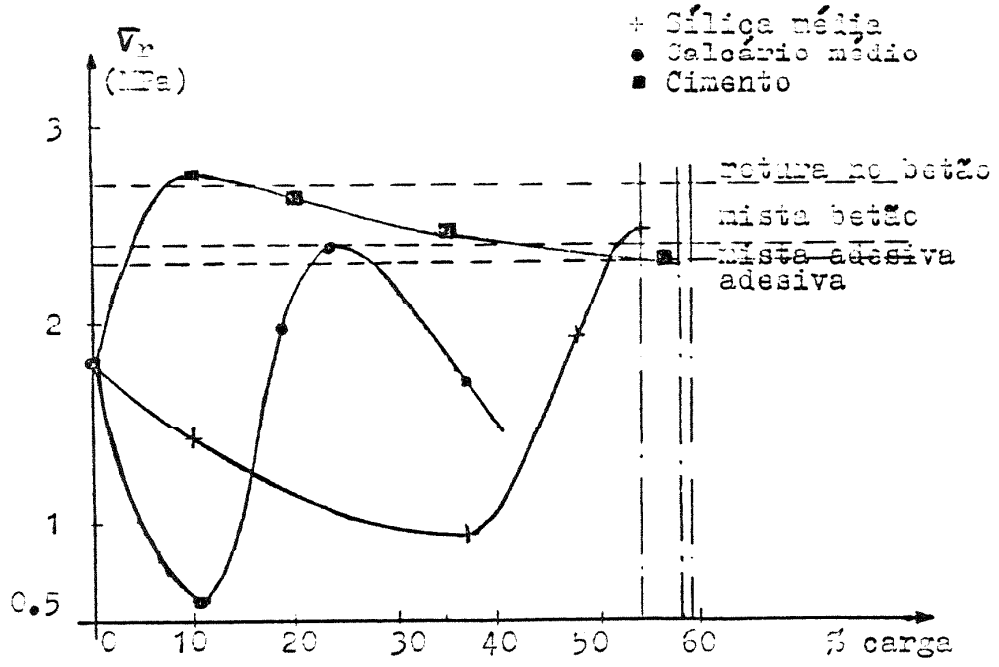


Fig. 7.26 - *Aderência em função da dosagem de carga - Epóxido Y*

Como conclusão podemos referir que o cimento não altera significativamente, o comportamento dos epóxidos em meio húmido quando comparado com o proporcionado por outras cargas. Continua a verificar-se a existência de uma dosagem óptima do ponto de vista da aderência. Quando nos afastamos dessa dosagem as roturas variam de adesivas a mistas, tal como acontece para as cargas calcárias e siliciosas anteriormente estudadas.

7.4 Avaliação da resistência das ligações betão / epóxido com ensaios da mecânica da fractura

7.4.1 Introdução

No número anterior estudámos as ligações betão / epóxido através de ensaios de tracção directa. Tendo em conta estudos anteriores [11,12] apenas nos interessámos pelas colagens em meio húmido. As colagens em meio seco não colocam grandes problemas obtendo-se sempre roturas tipo I.

O estudo da aderência entre betão húmido e epóxido através de ensaios de tracção directa permitiu concluir que é possível obter boas aderências quer com cargas siliciosas, quer com cargas calcárias desde que seja adicionada ao epóxido uma determinada quantidade de carga mineral. As dosagens de carga mineral que correspondem às resistências óptimas são bem definidas para cada tipo de carga e granulometria e a utilização de dosagens diferentes conduz, geralmente, a reduções significativas da resistência.

Os ensaios de tracção directa mostram-se pouco válidos para caracterizar a aderência. Em primeiro lugar quando a rotura é do tipo I sabemos que a colagem resiste mais do que o betão mas não sabemos dizer qual é a sua resistência. Por outro lado, é bem conhecida a influência das dimensões dos provetes sobre os resultados que se obtêm com este tipo de ensaios.

A mecânica da fractura é uma disciplina que a partir de uma análise mecânica permite a determinação de parâmetros da fissura, cujos valores críticos são característicos dos materiais. A sua determinação permitirá caracterizar de forma mais precisa a aderência entre os epóxidos e o betão. Por outro lado, a mecânica da fractura permite-nos conhecer a influência dos defeitos que estão sempre presentes nas colagens.

Escolhemos o ensaio tipo DCB porque é o ensaio que melhor nos permite seguir a propagação da fissura, uma vez que ela atinge um comprimento mais elevado comparado com o de outros ensaios utilizados em mecânica da fractura (flexão três e quatro pontos, por exemplo). Os provetes utilizados na flexão apresentam comprimentos da ordem dos 10 cm o que é muito reduzido, sobretudo se atendermos a que o comprimento da zona microfissurada no betão varia entre 6 e 8 cm.

Tendo em conta que as dimensões dos provetes a utilizar são função do maior defeito do material, a escolha do betão conduzir-nos-ia a provetes muito grandes. Por este motivo utilizámos provetes de argamassa normal de dimensões mais aceitáveis. A utilização de provetes de dimensões muito elevadas reduziria o número de ensaios que era possível efectuar. Por outro lado, a aderência dos epóxidos a uma argamassa não será muito diferente da que se verifica entre epóxidos e betão.

O cálculo da taxa de libertação da energia de deformação, G, pelo método da complacência necessita que seja conhecido, de forma correcta, o comprimento da fissura em cada instante. A visualização da frente da fissura não é fácil, conhecido que é o fenómeno da microfissuração do betão. Com a finalidade de localizar a posição exacta da frente de fissura utilizamos três métodos: localização acústica, deflectómetros eléctricos e complacência dos provetes.

Tendo em atenção o estudo que efectuámos no número anterior, sobre a influência da espessura na aderência resolvemos escolher a espessura de 1 mm para as nossas colagens. Foi com esta espessura que fomos conduzidos a um maior número

de roturas no betão.

7.4.2 Técnicas de ensaio

7.4.2.1 Os materiais

Utilizámos uma argamassa normal tal como está definida na norma francesa NFP 15-403 de Julho de 1963. O cimento utilizado é um cimento portland de alta resistência.

Esta argamassa quando submetida a um ensaio de tracção directa apresenta um comportamento linear sobre a maior parte da curva tensões-extensões, com:

— extensão à rotura: $\varepsilon_{rp} \simeq 10^{-4}$

— módulo de elasticidade na origem: $E_0 = 35\ GPa$

— tensão de rotura à tracção: $\sigma_{rp} \simeq 6,4\ MPa$.

O epóxido escolhido teve em atenção os resultados obtidos no estudo anterior. Assim, quisemos escolher o epóxido que apresentou melhores resultados. A análise desse estudo leva-nos a concluir que o Epóxido Y + Calcário $1/2$ é o polímero com mais roturas do tipo I (betão). As dosagens que melhores resultados apresentaram foram 10% e 20% de carga calcária. Destas duas escolhemos os 20% porque conduz a um epóxido mais viscoso o que facilita o desenrolar das colagens porque o polímero escorre menos.

7.4.2.2 Fabricação dos provetes

Os provetes confeccionados são do tipo DCB (Figs. 7.27 e 7.28). O estado de superfície da argamassa é sempre serrado. As superfícies serradas obtêm-se com 28 dias de idade e têm o aspecto da figura 7.29.

No momento das colagens as superfícies apresentam-se secas. Para de obter uma boa reprodutibilidade deste estado de superfície, os provetes retiram-se de dentro de água 7 dias antes da data da sua colagem.

Antes da colagem as superfícies são esfregadas com papel de lixa e varridas com um jacto de ar comprimido para eliminar todas as partículas friáveis ou soltas.

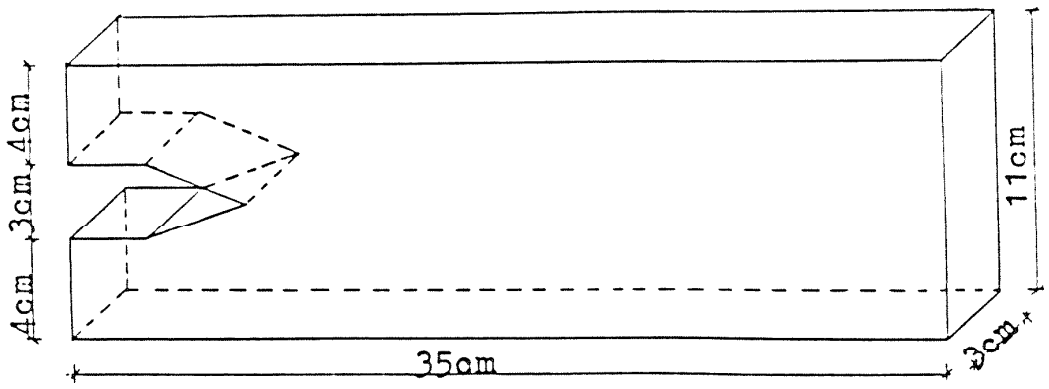


Fig. 7.27 - *Dimensões do provete tipo DCB*

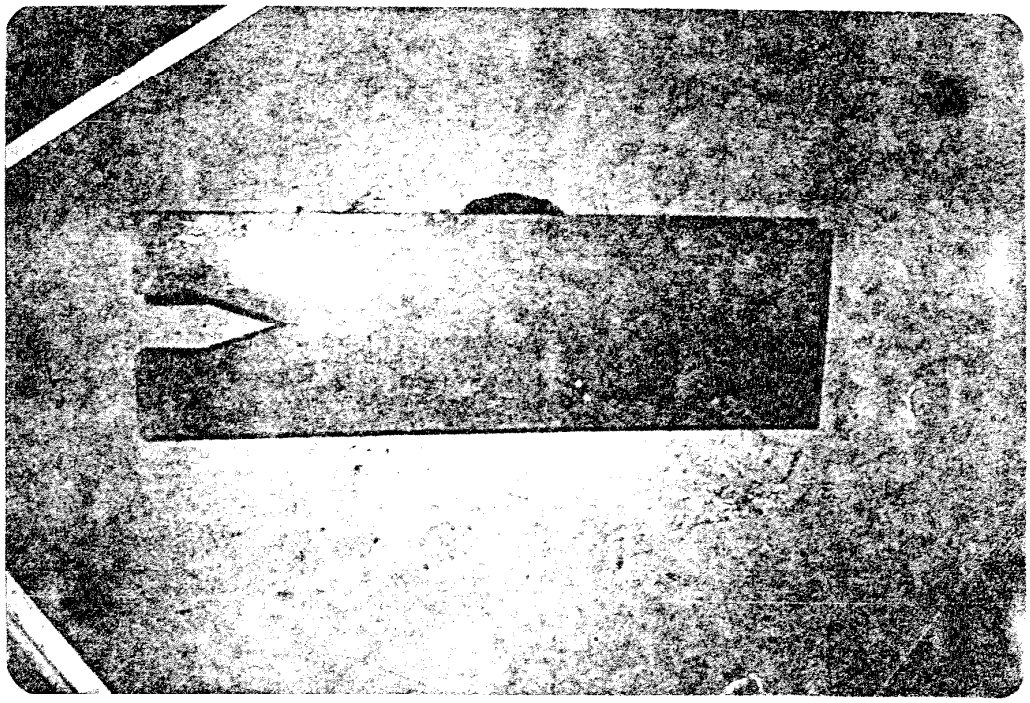


Fig. 7.28 - *Provete DCB em argamassa*

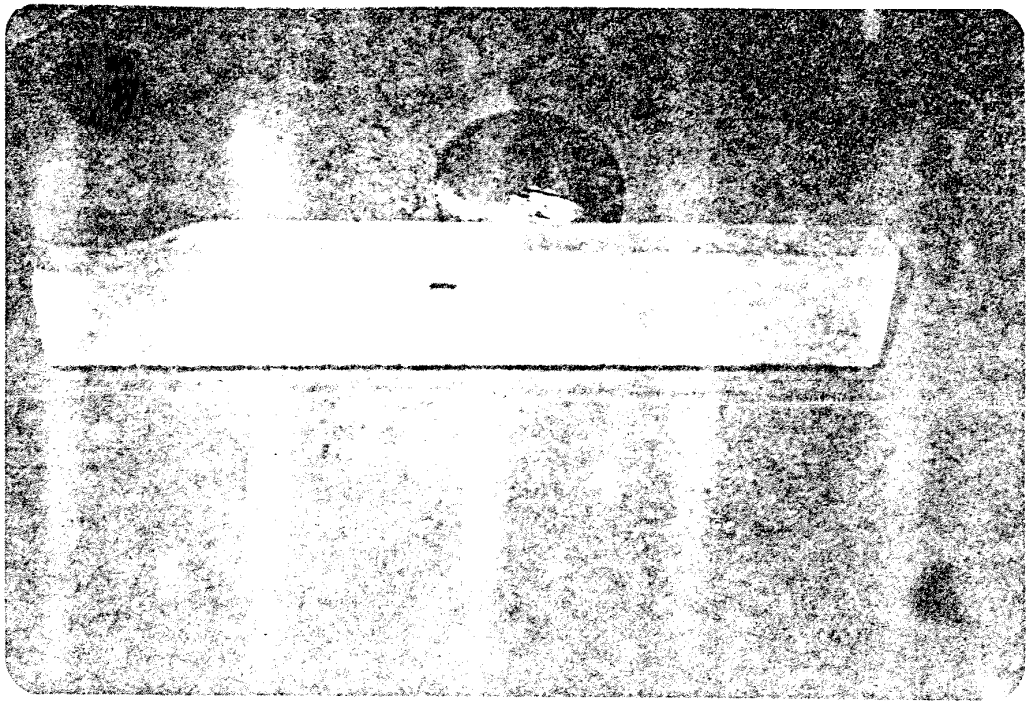


Fig. 7.29 - *Meio - provete após serragem*

7.4.2.3 Processo de união

As superfícies serradas de cada meio - provete são cuidadosamente cobertas de uma camada de epóxido, com o auxílio de uma espátula. Passado o espaço de tempo de espera exigido (dependente da cinética de polimerização do epóxido), procede-se à união dos dois meios - provetes. Pequenas placas metálicas com 1 mm de espessura permitem a obtenção desta espessura sem termos de nos preocupar com a massa de polímero a utilizar (Fig. 7.30). As colagens são conservadas numa superfície lisa e mantidas com o auxílio de serra-juntas durante 24 horas para uma melhor molhagem do suporte argamassa. Os provetes reconstituídos são conservados numa sala a $20 \pm 2°C$ e com pelo menos 50% de humidade relativa, durante 72 horas. Após este espaço de tempo os provetes são conservados dentro de água a $20 \pm 1°C$.

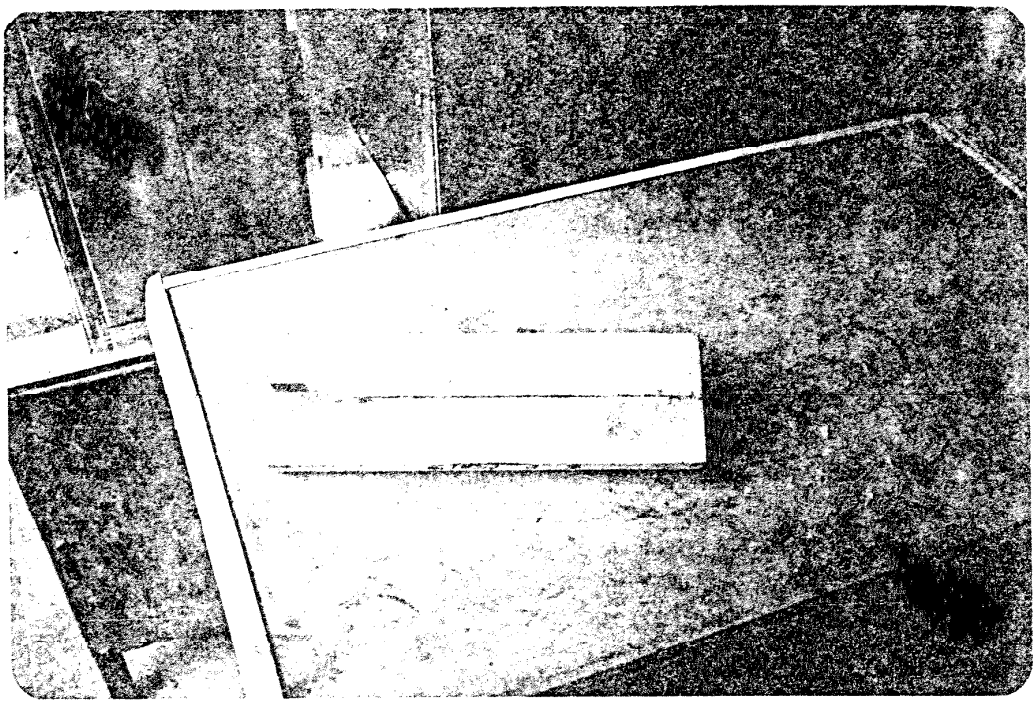


Fig. 7.30 - *Provete reconstituído*

7.4.2.4 Caminho de fissura e reforço

Sete dias após a união procede-se a uma redução de secção por serragem (Fig. 7.31). Esta redução da secção tem por objectivo produzir um caminho de fissura de tal forma que a fissura seja obrigada a percorrê-lo. Sem este caminho de fissura, esta segue um percurso sinuoso, sendo difícil a determinação do seu comprimento. O caminho de fissura obtido tem as dimensões de $7,5 \times 3\ mm^2$ de cada lado do provete.

Após a criação do caminho de fissura procede-se ao reforço dos provetes com quatro placas em aço de 3 mm de espessura (Figs. 7.31 e 7.32). A colagem destas placas metálicas faz-se com um epóxido com cargas, para evitar o escorrimento da cola. Antes da colagem, as superfícies de argamassa são esfregadas com papel de lixa e varridas com jacto de ar comprimido. As superfícies de aço são limpas superficialmente com o auxílio de um pano molhado em acetona. Todos os vestígios de oxidação devem ser removidos. As colagens são carregadas durante 24 horas para uma melhor repartição da cola.

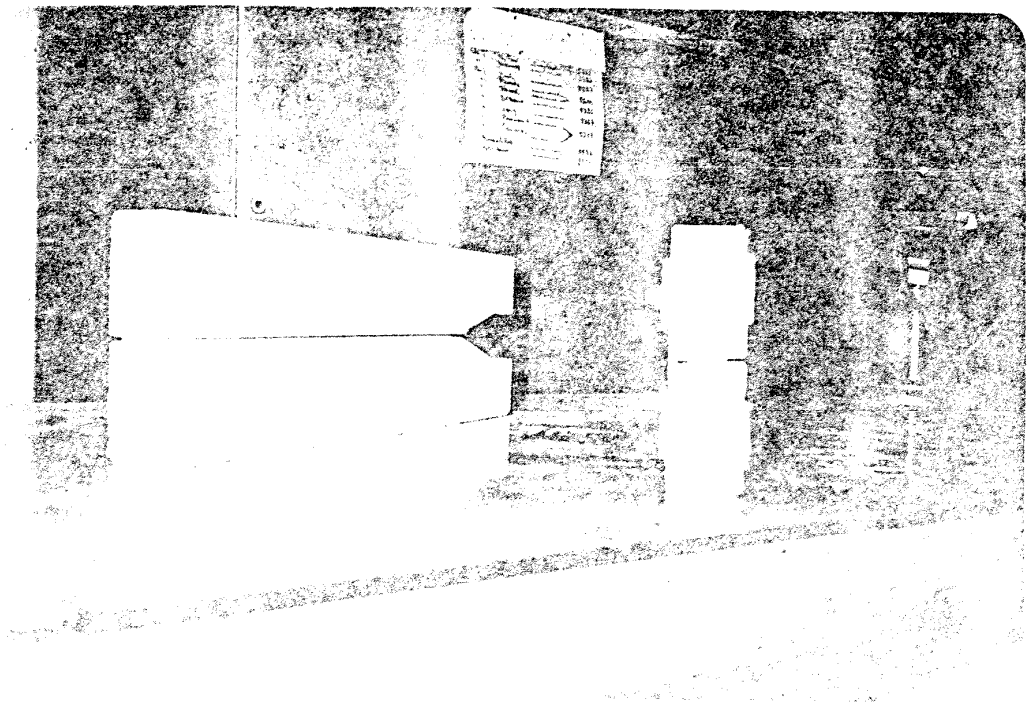


Fig. 7.31 - *Caminho de fissura e reforço dos provetes.*

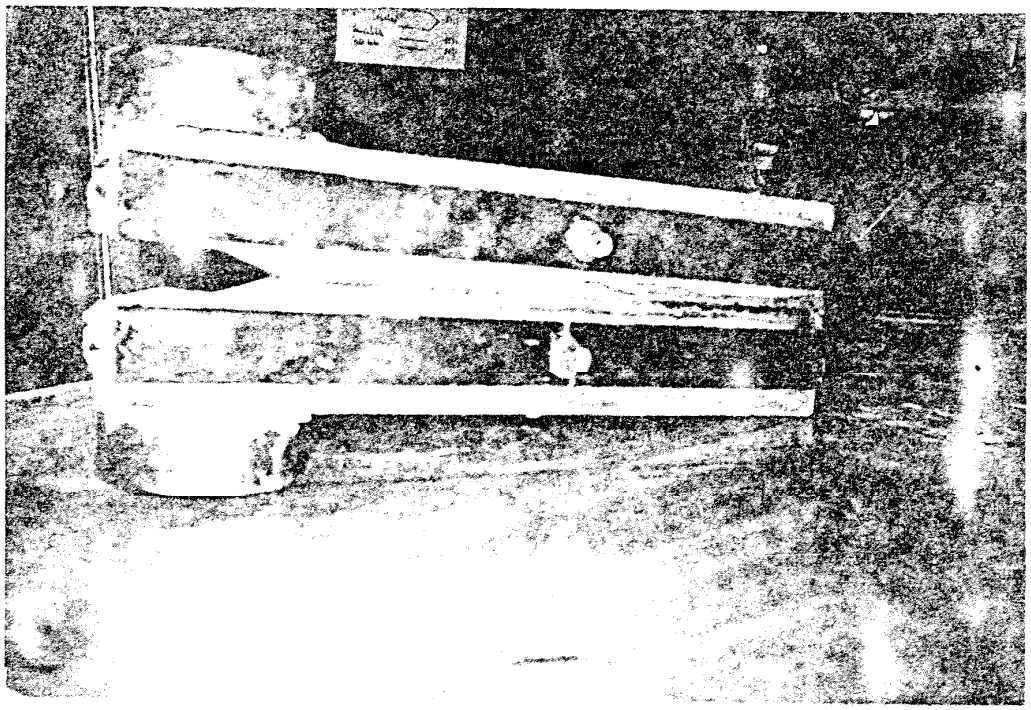


Fig. 7.32 - *Provete de argamassa + cola reforçado.*

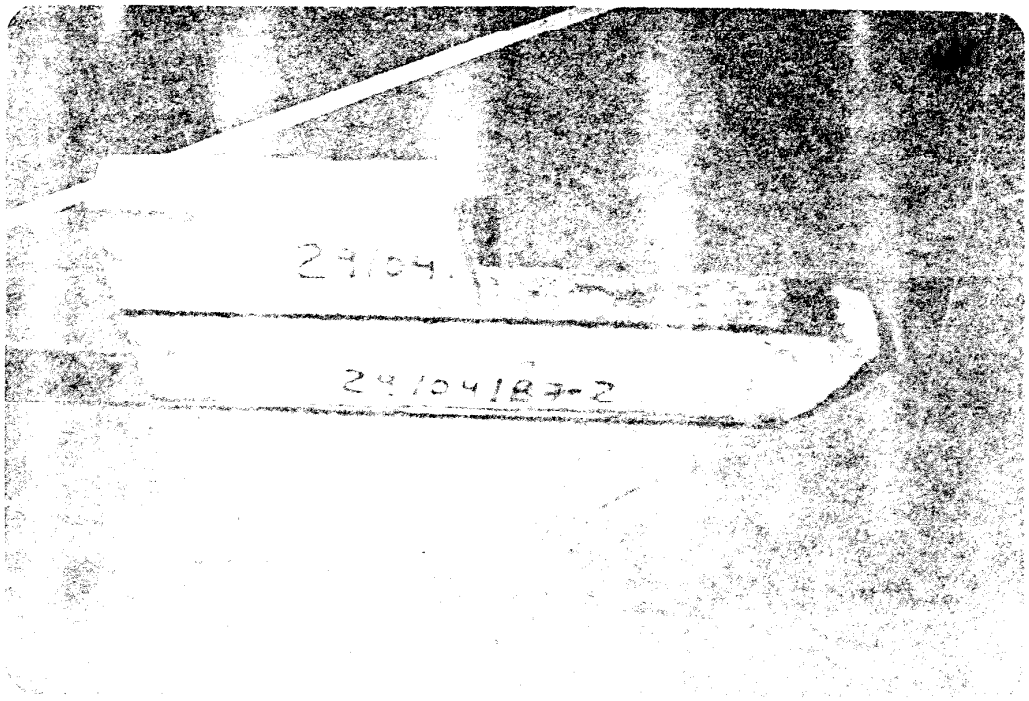


Fig. 7.33 - *Rotura de provete não reforçado.*

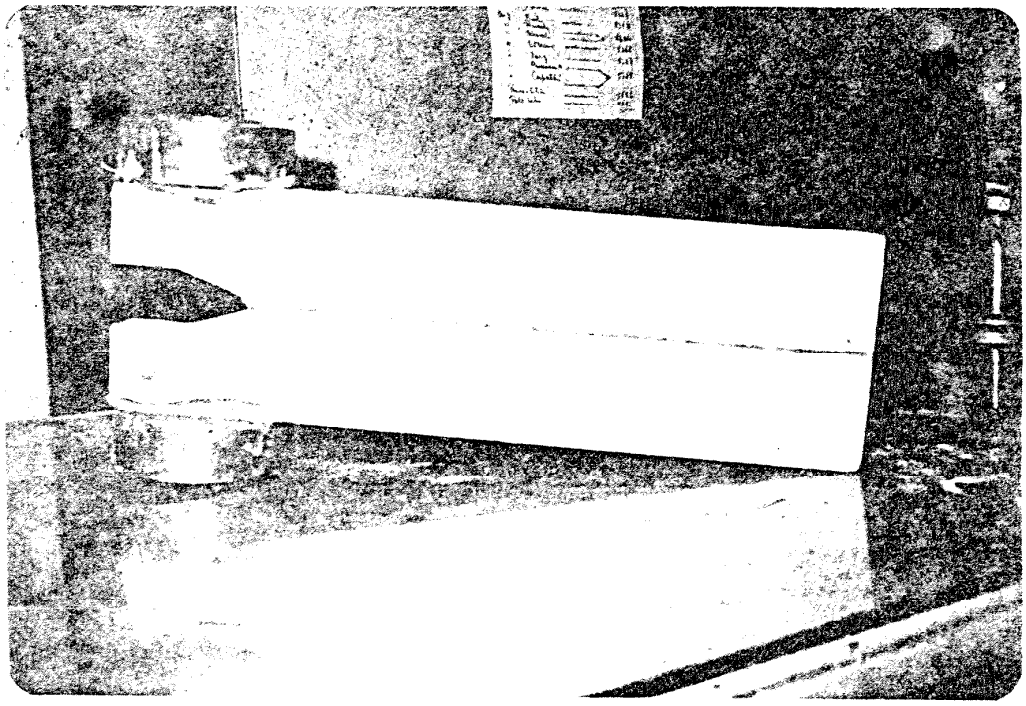


Fig. 7.34 - *Provete com peças de adaptação à máquina de tracção.*

O reforço com chapas de aço coladas mostrou-se necessário para obrigar a fissura a percorrer todo o comprimento do provete. Quando não se efectua o reforço os provetes rompem da forma que se mostra na figura 7.33.

Antes ou depois de se efectuar o reforço colam-se duas peças metálicas sobre os provetes (Fig. 7.34) que possibilitarão a união ao sistema da máquina de tracção.

7.4.2.5 O ensaio

O ensaio desenrola-se numa máquina de tracção Zwick (Figs. 7.35 e 7.36).

Para começar efectuam-se ciclos de fadiga para termos uma frente de fissura bem marcada e eliminarmos todos os problemas de jogo da montagem que podem conduzir à não linearidade da curva carga-deformação. Efectuam-se 10 ciclos a 20 daN (carga máxima). Estes ciclos de carga-descarga efectuam-se à velocidade de $0,240\ mm/min$.

Depois começa-se o ensaio propriamente dito com uma velocidade de $0,015$-mm/min. Quando se observa que a carga baixa para-se a máquina de tracção e deixa a fissura propagar-se a afastamento constante durante 15 minutos. Após este espaço de tempo descarrega-se o provete e carrega-se logo de imediato até nova descida da carga, para a qual parámos novamente 15 minutos. Fazem-se três ciclos de carga-descarga. Nos primeiros ensaios efectuámos mais ciclos, mas, dado que os valores da taxa de libertação da energia de deformação ao fim de cada ciclo terão que ser os mesmos, não se torna necessário efectuar tantos ciclos. A série de ensaios em que efectuámos mais ciclos designaremos por Série de Ensaios no. 1, aquela em que efetuamos três ciclos designaremos por Série de Ensaios no. 2.

Após o último ciclo efectuámos de novo um carregamento do provete mas, quando chegámos a cerca de 50% da carga máxima do ciclo anterior aumentamos a velocidade do ensaio para um valor entre 1 e 30 mm/min. Após esta alteração retirámos o deflectómetro, para que não fique danificado e continuámos o ensaio até à rotura total do provete. Registámos a carga correspondente a esta rotura. Esta alteração da velocidade permite-nos determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação, G_c. Com velocidades muito elevadas podemos dizer que $G_{max} \simeq G_c$ [35].

1 Prato superior fixo
2 Prato médio móvel
3 Escala ranhurada
4 Prato inferior regulável
5 Base
6 Cabeça de amarração superior
7 Provete
8 Cabeça de amarração inferior

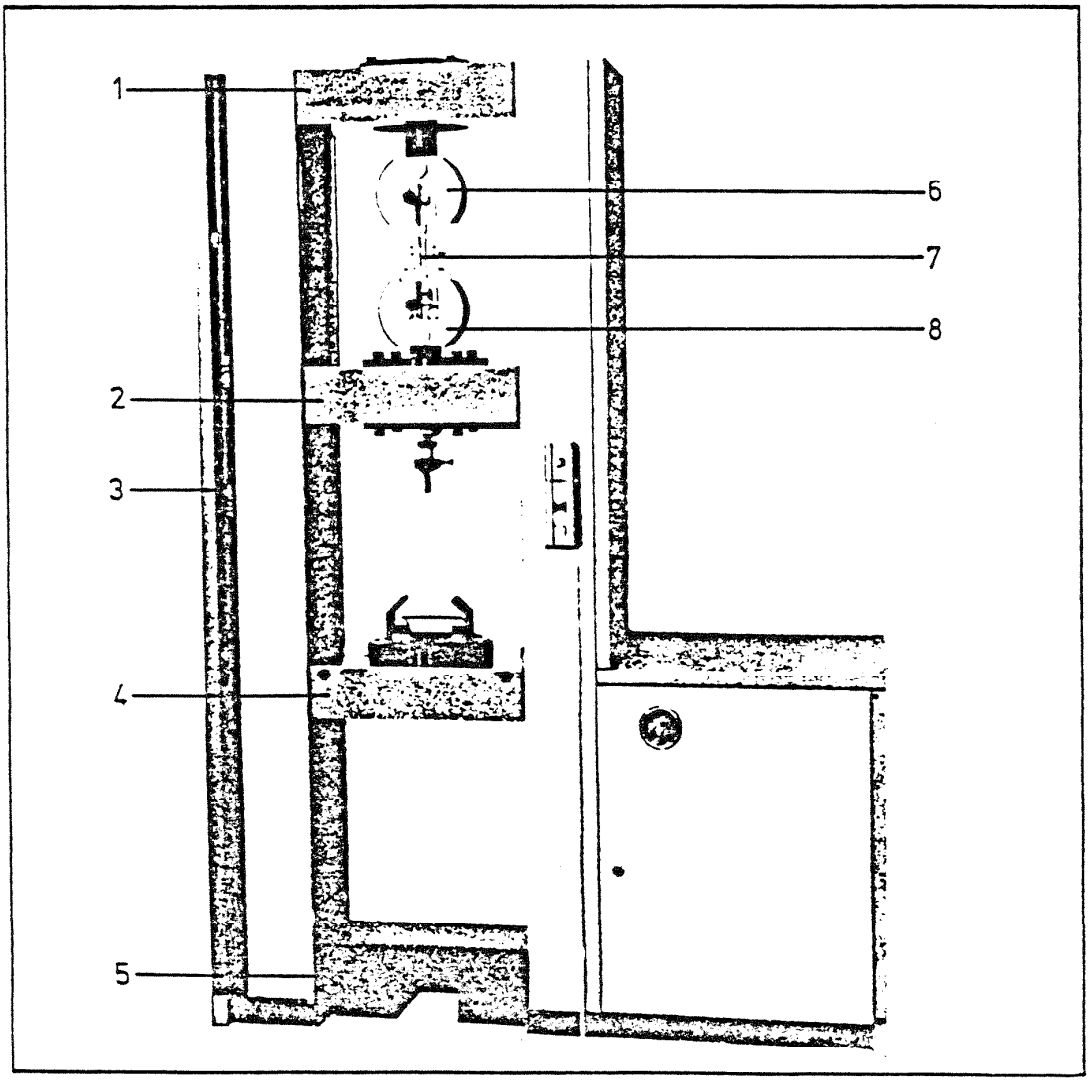


Fig. 7.35 - *Máquina de tracção "Zwick"*

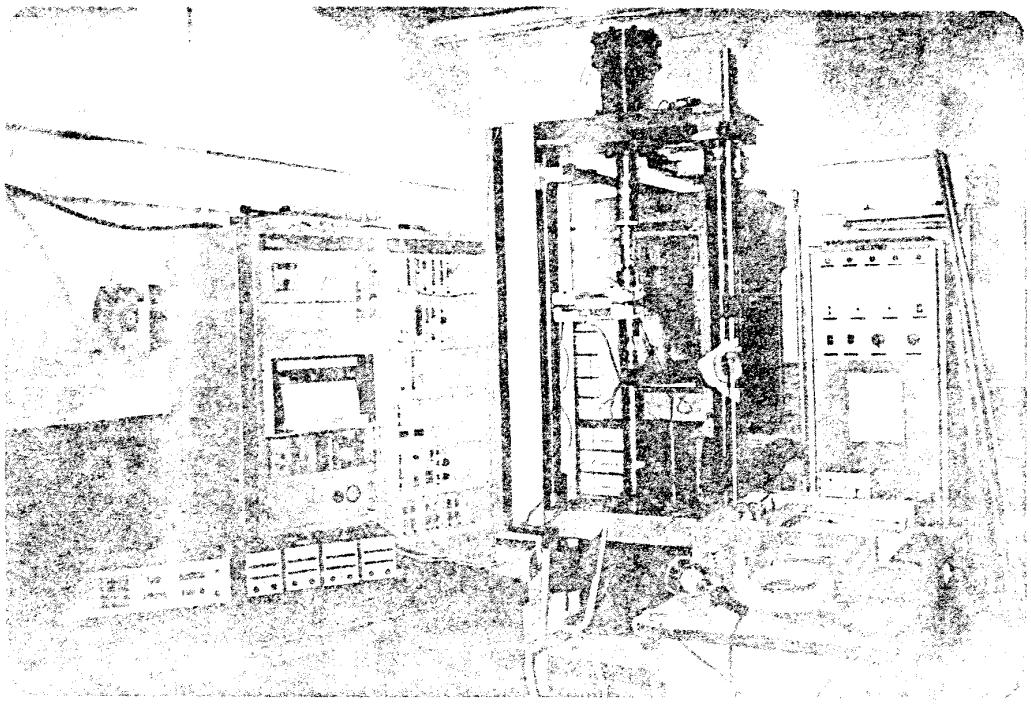


Fig. 7.36 - *Aspecto geral da máquina de tracção*

7.4.3 Avaliação do comprimento das fissuras

7.4.3.1 Introdução

Os primeiros ensaios efectuados tiveram como objectivo principal a escolha do melhor método para avaliar o comprimento das fissuras. O conhecimento deste é de primordial importância para o cálculo da taxa de libertação de energia de deformação. Três métodos foram utilizados: emissão acústica, deflectómetro a meio do caminho da fissura e complacência dos provetes.

7.4.3.2 Emissão acústica

Designa-se por emissão acústica toda a manifestação de uma onda de deslocamento cuja fonte se encontra no seio de um material submetido a diversas modificações, uma parte desta energia, quase sempre muito fraca, pode libertar-se sob a forma de uma onda de tensão ou de deslocamento.

Quando um provete se deforma, observam-se ondas do tipo representado na figura 7.37 cujo intervalo de tempo separa dois sinais, a amplitude e a frequência podem ser muito variáveis. As ondas emitidas contêm informações sobre os mecanismos físicos elementares que as originam [156].

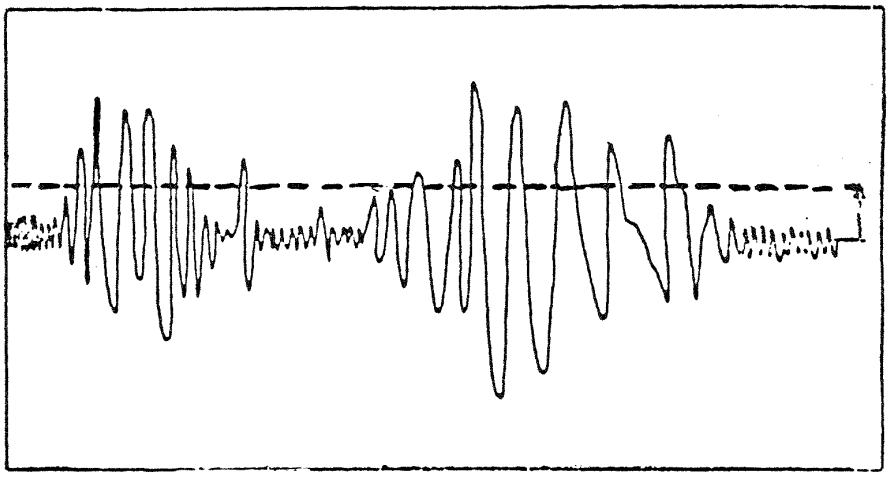


Fig. 7.37 - *Ondas de emissão acústica. Técnica de contagem. 14 alternâncias; 2 acontecimentos.*

O princípio da localização das fontes emissoras é relativamente simples. As diferenças de tempos de excitação dos receptores (em μs) representam-se através de hipérboles de triangulação cujo ponto de intersecção obtido através de um formalismo matemático adequado é teóricamente o ponto emissor.

A figura 7.38 mostra a montagem de um sistema de localização.

O provete ou a estrutura submetidos a uma tensão têm defeitos em evolução que emitem uma mensagem sob a forma de uma onda elástica propagando-se no material. Os diferentes detectores recebem essa onda e geram um sinal eléctrico adaptado e explorado pelo equipamento eléctrico.

Para os nossos ensaios 4 receptores ressonantes, ligados a amplificadores de condicionamento (frequência de 200 KHz) e ligados com o auxílio de gordura de silicone (Fig. 7.39) dispõem-se segundo uma malha rectangular de um lado e do outro do caminho da fissura. Após amplificação as saídas dos 4 receptores enviam-se para as quatro vias do analisador de emissão acústica (Fig. 7.38).

Após inicialização do sistema, um impulso de emissão acústica que chega a um dos quatro receptores vai fazer passar uma cadeia de impulsos sobre os contadores de impulsos associados às outras três vias. Logo que o impulso de emissão acústica

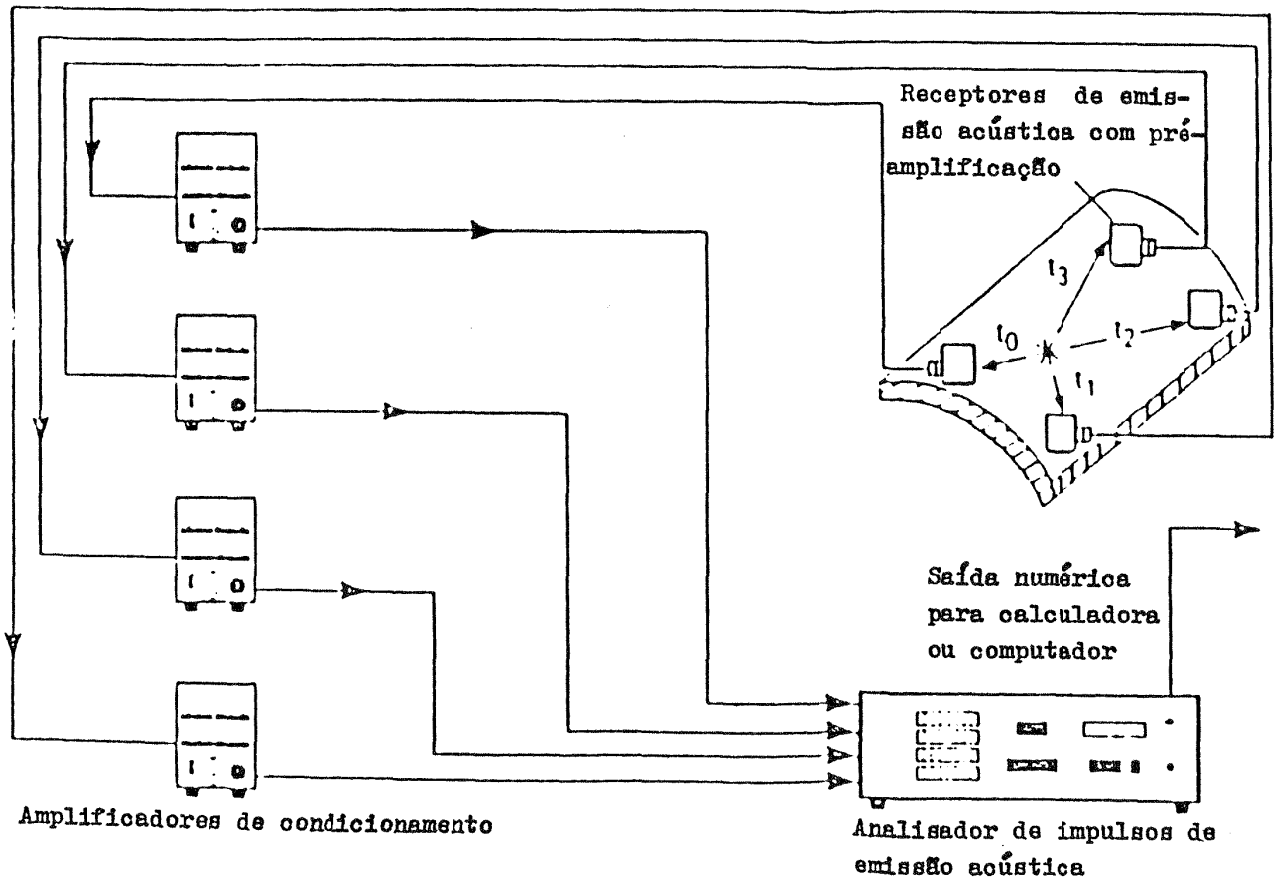


Fig. 7.38 - *Sistema de localização de fonte de emissão acústica em duas dimensões.*

atinge as outras três vias, os contadores correspondentes param de tal forma que o analisador de emissão acústica fixa a data de chegada relativa (em μs) do ruído de emissão acústica sobre três receptores em relação ao quarto. A relação entre os três tempos afixados define a posição sobre a superfície do objecto ensaiado de onde vem o ruído de emissão acústica.

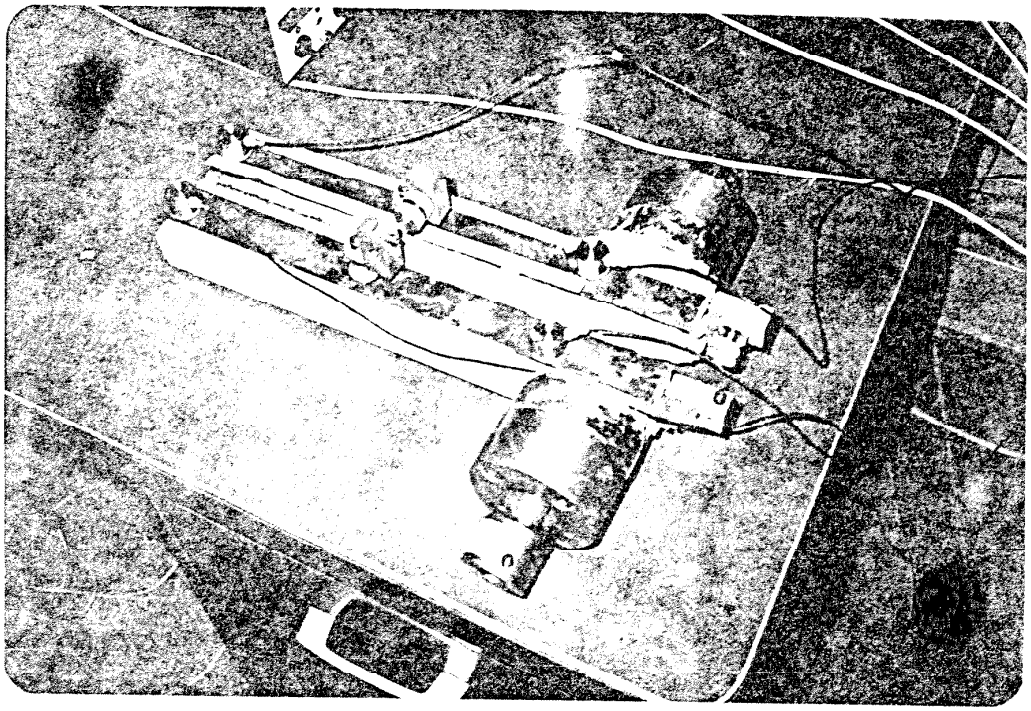


Fig. 7.39 - *Disposição dos receptores de emissão acústica*

A comunicação numérica sobre as quatro vias efectua-se através de uma interface a uma calculadora. Um programa foi elaborado para o funcionamento do analisador de impulsos de emissão acústica, através do qual pode observar-se a iniciação e a progressão da fissura no provete.

A precisão do resultado da localização depende das posições relativas da fonte e dos receptores, da disposição dos receptores e do conhecimento exacto da velocidade de propagação das ondas. É possível localizar uma fonte acústica com precisão dentro de uma malha quadrada de 4 receptores distando 10 *cm*.

A calibração efectua-se partindo uma mina de lápis na proximidade dos receptores 1,2,3 e 4 no interior do perímetro, controla-se os valores Δt afixados. Isto permite verificar o bom funcionamento do sistema de localização.

7.4.3.3 Deflectómetro

Para localizar a fissura colocámos um deflectómetro eléctrico (Fig. 7.40) sensivelmente a meio da caminho da fissura. Esta atinge um comprimento igual à distância a que se encontra o deflectómetro quando este passa a indicar afastamento dos dois pontos. Inicialmente os dois pontos aproximam-se e só quando a fissura passa entre eles é que o deflectómetro começa a indicar afastamento dos dois pontos.

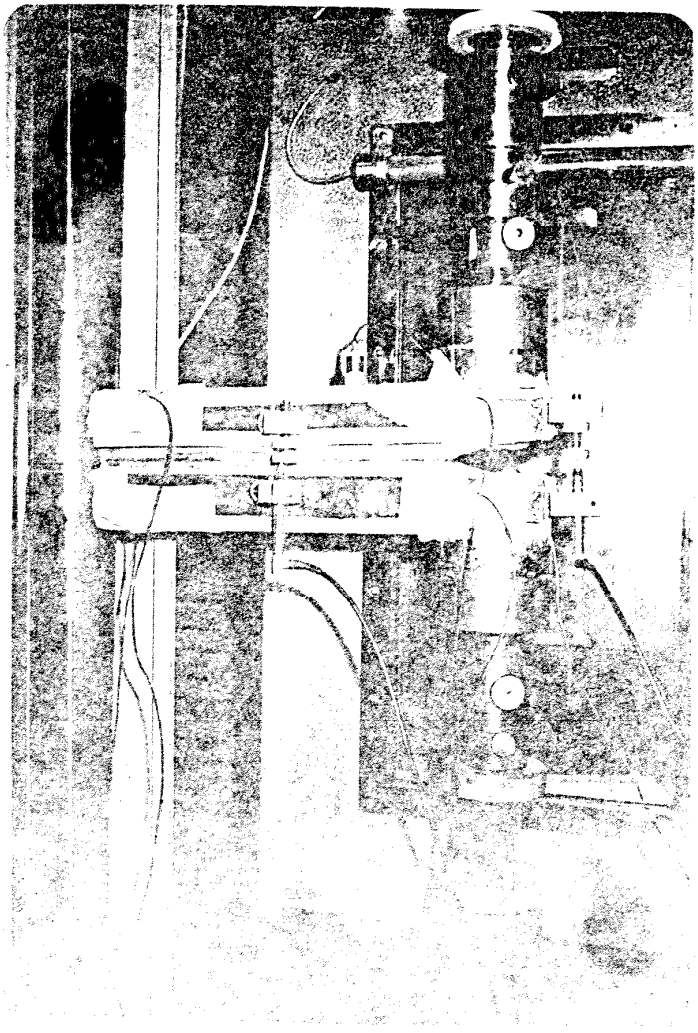


Fig. 7.40 - *Deflectómetro a meio do caminho da fissura.*

7.4.3.4 Complacência dos provetes

Este método de localização consiste em determinar com o auxílio do programa de elementos finitos César [157] a complacência do provete correspondente a um dado comprimento de fissura imposto. A figura 7.41 mostra as regiões consideradas e no Anexo 3 apresentam-se os resultados obtidos.

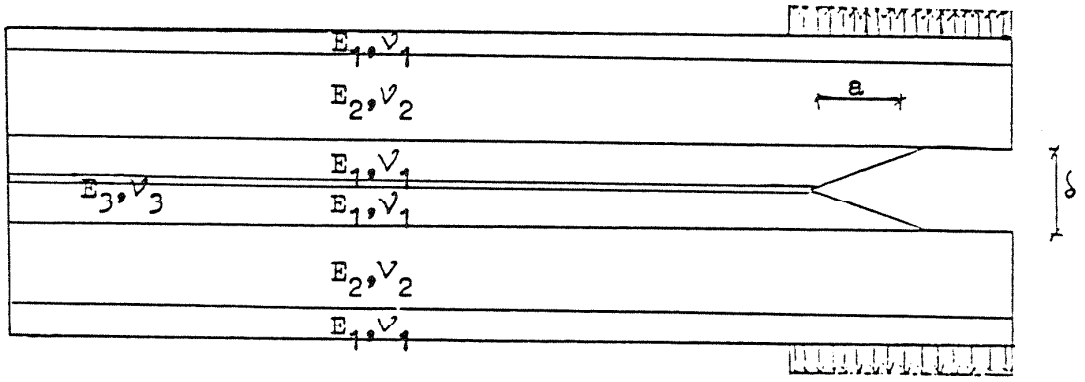


Fig. 7.41 - *Posição dos diversos materiais que constituem os provetes*

QUADRO 7.18

Materiais	a (cm)	δ (cm)	F (MN)	C (cm/MN)
argamassa	3,0	$0,0884 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	1,1050
	10,5	$0,8420 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	10,5250
	25,5	$8,0352 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	100,4400
argamassa + cola	3,0	$0,1024 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	1,2800
	10,5	$0,9037 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	11,2962
	25,5	$8,6638 \times 10^{-3}$	8×10^{-5}	108,2975

No Quadro 7.18 apresentam-se as complacências correspondentes aos diversos comprimentos de fissura estudados.

Para as duas situações estudadas os módulos de elasticidade longitudinal e os coeficientes de Poisson considerados foram os seguintes:

Argamassa

$$E_1 = 35\ GPa;\ \nu_1 = 0,20$$

$$E_2 = 75\ GPa;\ \nu_2 = 0,20$$

$$E_3 = 35\ GPa;\ \nu_3 = 0,20$$

Argamassa + cola

$$E_1 = 35\ GPa;\ \nu_1 = 0,20$$

$$E_2 = 75\ GPa;\ \nu_2 = 0,20$$

$$E_3 = 5\ GPa;\ \nu_3 = 0,30$$

O valor de E_2 foi obtido considerando um módulo de elasticidade equivalente para a zona reforçada dos provetes. Assim, considerando os materiais que constituem a referida zona e as suas espessuras, temos a seguinte expressão:

$$3 \times E_2 = 35 \times 3 + 200 \times 0,6 + 5 \times 0,2$$

donde

$$E_2 = 75\ GPa$$

A figura 7.42 mostra a variação da complacência com o comprimento da fissura.

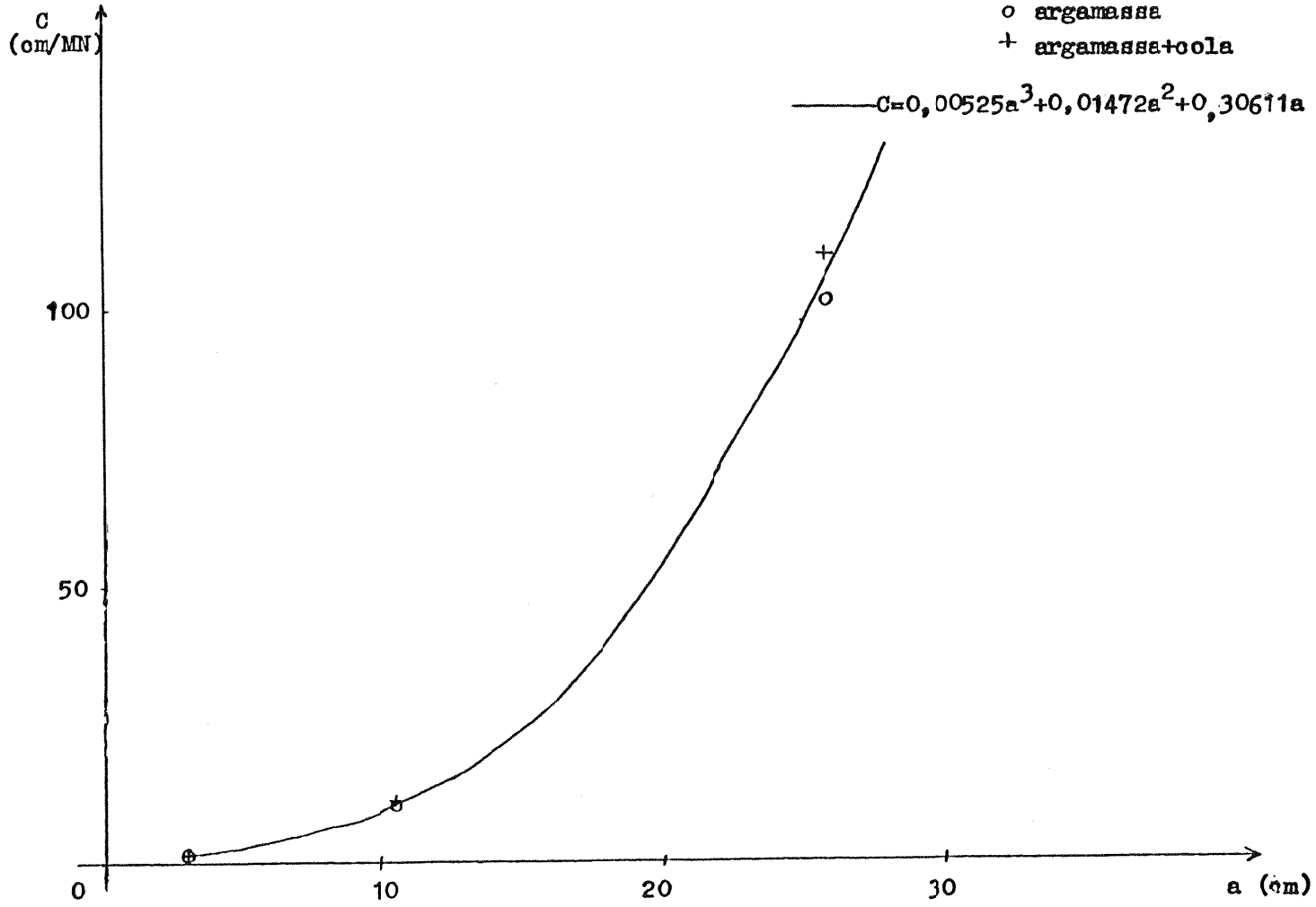


Fig. 7.42 - *Variação da complacência dos provetes com o comprimento da fissura.*

Com os pontos obtidos é possível chegar à equação de uma curva do 3^o grau em a. Sabemos que as expressões para o cálculo de G, taxa de libertação de energia de deformação podem ser de dois tipos:

$$G = \frac{P^2}{2\,B}\,\frac{dC}{da} \tag{7.1}$$

Esta é a fórmula do método da complacência. Outra expressão é apresentada por Srawley J. E. e Gross B. [158] e é a seguinte:

$$G = \frac{12\,P^2}{B^2\,h^3\,E}\,(a^2 + 1,32\,h\,a + 0,532\,h^2) \tag{7.2}$$

Igualando as duas expressões (7.1) e (7.2), vem:

$$\frac{dC}{da} = \frac{12}{B\,h^2\,E}\,(a^2 + 1,32\,h\,a + 0,532\,h^2)$$

Como B, h e E são constantes, temos:

$$\frac{dC}{da} = f(a^2)$$

e, portanto:

$$C = f(a^3) \tag{7.3}$$

Por outro lado, como para $a = 0$, $G = 0$, a expressão (7.3) é da seguinte forma:

$$C = \alpha_1\,a^3 + \alpha_2\,a^2 + \alpha_3\,a$$

Fazendo passar esta curva pelos três pontos obtidos com os cálculos pelo método dos elementos finitos temos:

$$C = 0,00525\,a^3 + 0,01472\,a^2 + 0,30611\,a \tag{7.4}$$

com C em cm/MN e a em cm.

Derivando a expressão (7.4) em ordem a a, vem:

$$\frac{dC}{da} = 0,01575\,a^2 + 0,02944\,a + 0,30611 \tag{7.5}$$

Substituindo (7.5) em (7.1), obtemos:

$$G = \frac{P^2}{2\,B}\,(0,01575\,a^2 + 0,02944\,a + 0,30611 \tag{7.6}$$

com G em MN/cm, P em MN, a e B em cm.

7.4.4 Resultados

7.4.4.1 Série de ensaios no. 1

As curvas obtidas durante os ensaios apresentam-se no Anexo 4.

Os símbolos apresentados no Anexo 4 têm o significado que se indica na figura 7.41. P é a carga concentrada aplicada correspondente à carga distribuída da figura 7.41.

Nos Quadros 7.19 a 7.27 apresentam-se os cálculos do comprimento de fissura, a e da taxa de libertação de energia de deformação a velocidade nula, G_0. Os valores apresentados para comprimento de fissura calculados com auxílio do deflectómetro situado sensivelmente a meio do caminho da fissura, foram determinados considerando um translacção da curva correspondente ao comprimento de fissura calculado pelo método da complacência. Assim, fez coincidir-se aquela curva com o ponto determinado pela posição do deflectómetro.

Os cálculos de G_0 efectuaram-se com a expressão (7.6).

Nos Quadros 7.19 a 7.27 apresenta-se também o valor médio de G_0 e o coeficiente de variação dado pela expressão:

$$C.V. = \frac{\Delta}{G_{0m}}$$

em que:

> Δ é o desvio padrão e G_{0m} é o valor médio da taxa de libertação de energia de deformação.

Estes valores são calculados pelas expressões seguintes:

$$G_{0m} = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_{0i}}{n}$$

e

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(G_{0i} - G_{0m})^2}{n-1}}$$

em que n é o número de ciclos efectuado.

QUADRO 7.19

Provete 1.1
Argamassa + Epóxido
Rotura mista adesiva
$B = 2,98\,cm$; $2h = 10,94\,cm$; $a_0 = 2,78\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
141	7,00	—	8,0	5,58	—	51,69	32,05
133	9,00	—	10,0	7,58	—	64,57	42,57
123	10,50	—	10,5	8,08	—	59,70	39,91
118	10,50	—	10,5	8,08	—	54,94	36,73
108	11,00	—	10,5	8,08	—	46,02	30,77
107	20,00	—	13,7	11,28	—	70,41	50,76
98	23,50	—	14,7	12,28	—	66,75	49,03
87	28,00	—	15,9	13,48	—	60,40	45,27
83	34,00	—	16,3	13,88	—	57,45	43,33
74	39,00	—	17,7	15,28	—	52,94	40,73
68	45,50	—	18,8	16,38	—	49,86	38,90
62	52,50	—	19,8	17,38	—	45,56	35,96
53	63,00	—	21,0	18,58	—	37,09	29,65
54	69,00	—	21,7	19,28	—	40,91	32,92
51	76,00	—	22,5	20,08	—	39,02	31,63
52	78,50	—	22,8	20,38	—	41,58	33,79
50	88,00	—	23,8	21,38	—	41,65	34,12
51	95,50	—	24,5	22,08	—	45,74	37,68
				$G_{0m}(N/m)$	—	51,46	38,10
				C. variação	—	0,196	0,164

QUADRO 7.20

Provete 1.2

Argamassa + Epóxido

Rotura mista adesiva

$B = 3,04\,cm$; $2h = 10,96\,cm$; $a_0 = 2,96\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
85	16,0	11,96	12,5	13,36	34,59	37,25	41,72
77	20,5	12,96	13,8	14,66	32,50	36,20	40,20
72	24,0	13,96	14,9	15,76	32,28	36,16	39,92
66	28,5	13,96	15,8	16,66	27,13	33,70	37,03
62	34,0	14,96	16,8	17,66	27,01	33,17	36,28
58	38,5	15,96	17,5	18,36	26,49	31,23	34,06
55	43,0	20,96	18,3	19,16	39,02	30,45	33,10
55	48,5	20,96	19,1	19,96	39,02	32,91	35,67
51	55,0	20,96	20,1	20,96	33,55	31,06	33,55
50	59,5	20,96	20,5	21,36	32,25	30,96	33,39
47	67,5	20,96	21,4	22,26	28,49	29,61	31,85
42	76,5	20,96	22,5	23,36	22,75	25,94	27,82
37	86,5	22,96	23,7	24,56	20,91	22,18	23,71
				$G_{0m}(N/m)$	30,46	31,60	34,48
				C. variação	0,184	0,132	0,144

QUADRO 7.21

Provete 1.3
Argamassa + Epóxido
Rotura mista adesiva
$B = 3,08\,cm$; $2h = 10,93\,cm$; $a_0 = 3,04\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
124	6,0	—	8,1	7,74	—	39,39	36,88
118	8,5	—	9,6	9,24	—	46,12	43,46
98	13,0	—	11,6	11,24	—	43,14	40,95
85	17,5	—	13,1	12,74	—	39,82	37,97
84	20,0	—	14,6	14,24	—	46,89	44,89
74	27,0	—	15,5	15,14	—	40,42	38,78
72	31,5	—	16,4	16,04	—	42,29	40,65
69	36,5	—	17,3	16,94	—	42,73	41,15
64	44,5	—	18,7	18,34	—	42,32	40,85
64	54,5	—	20,1	19,74	—	48,28	46,71
59	61,0	—	20,8	20,44	—	43,70	42,32
53	69,0	—	21,8	21,44	—	38,45	37,29
48	79,5	—	22,9	22,54	—	34,56	33,56
				$G_{0m}(N/m)$	—	42,16	40,42
				C. variação	—	0,088	0,088

QUADRO 7.22

Provete 1.4

Argamassa + Epóxido

Rotura mista adesiva

$B = 3,03\,cm$; $2h = 10,87\,cm$; $a_0 = 2,74\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
112	9,0	15,74	9,8	9,94	96,70	43,62	44,61
108	12,0	15,74	11,2	11,34	89,92	50,27	51,30
108	14,0	15,74	11,8	11,94	89,92	54,79	55,88
109	15,5	15,74	12,2	12,34	91,59	59,00	60,14
102	22,0	16,74	14,3	14,44	89,49	67,78	68,94
103	26,0	16,74	15,3	15,44	91,25	77,79	79,05
105	31,5	16,74	16,4	16,54	94,83	91,42	92,82
78	44,5	17,74	18,7	18,84	58,08	63,89	64,77
76	49,5	29,74	19,4	19,54	144,04	64,86	65,72
80	57,0	29,74	20,3	20,44	159,60	78,09	79,08
61	71,0	29,74	22,0	22,14	92,79	52,66	53,29
62	77,5	29,74	22,8	22,94	95,86	58,13	58,80
58	83,0	29,74	23,3	23,44	83,89	52,97	53,57
55	88,5	29,74	23,9	24,04	75,44	49,95	50,50
				$G_{0m}(N/m)$	96,67	61,80	62,75
				C. variação	0,265	0,214	0,214

QUADRO 7.23

Provete 1.5

Argamassa

$B = 3,00\,cm$; $w = 1,34\,cm$; $2h = 10,99\,cm$; $a_0 = 3,15\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
83	8,5	8,15	9,5	4,55	40,93	51,60	19,69
87	12,0	8,15	11,0	6,05	44,98	71,62	29,96
86	14,0	10,15	11,9	6,95	61,48	79,66	35,09
82	17,0	12,15	12,9	7,95	75,00	82,97	38,53
76	19,5	13,15	13,4	8,45	73,63	76,05	36,20
74	22,0	13,15	14,2	9,25	69,81	79,68	39,35
75	27,0	13,15	15,4	10,45	71,71	94,34	48,98
73	32,0	13,15	16,5	11,55	67,95	101,01	54,63
66	36,0	17,15	17,2	12,25	88,48	88,95	49,25
64	42,5	18,15	18,3	13,35	92,15	93,51	53,59
63	47,5	18,15	19,0	14,05	89,28	97,03	56,70
61	51,0	20,15	19,6	14,65	101,28	96,27	57,17
56	61,5	24,15	20,8	15,85	119,40	90,49	55,34
54	66,0	24,15	21,2	16,25	111,02	87,13	53,79
55	75,0	24,15	22,3	17,35	115,16	99,27	62,73
56	84,0	24.15	23,3	18,35	119,40	111,67	71,96
				$G_{0m}(N/m)$	83,85	87,58	47,69
				C. variação	0,297	0,161	0,282

QUADRO 7.24

Provete 1.6

Argamassa

$B = 3,01\,cm$; $w = 1,50\,cm$; $2h = 11,03\,cm$; $a_0 = 3,42\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
72	13,0	—	11,5	6,72	—	47,14	21,00
73	16,0	—	12,7	7,92	—	57,21	27,13
66	20,5	—	13,8	9,02	—	53,90	26,91
65	25,0	—	15,0	10,22	—	60,44	31,72
57	29,5	—	16,0	11,22	—	52,09	28,37
54	36,0	—	17,2	12,42	—	53,20	30,14
53	41,0	—	18,1	13,32	—	56,17	32,70
57	45,5	—	18,8	14,02	—	69,59	41,31
42	62,0	—	20,9	16,12	—	45,87	28,66
42	68,0	—	21,6	16,82	—	48,74	30,91
43	75,0	—	22,3	17,52	—	54,20	34,86
33	85,5	—	23,7	18,92	—	35,76	23,60
				$G_{0m}(N/m)$	—	52,86	29,78
				C. variação	—	0,157	0,177

QUADRO 7.25

Provete 1.7

Argamassa

$B = 2,99\,cm$; $w = 1,44\,cm$; $2h = 11,04\,cm$; $a_0 = 3,25\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
87	6,25	11,25	7,9	10,65	69,14	39,99	63,23
84	10,00	13,25	10,0	12,75	84,80	53,30	79,42
82	11,25	13,25	10,7	13,45	80,81	56,60	82,91
69	16,25	13,25	12,5	15,25	57,23	51,83	73,03
63	18,75	14,25	13,3	16,05	54,07	48,01	66,64
58	21,25	14,25	14,0	16,75	45,83	44,46	60,95
55	27,50	17,25	15,4	18,15	57,77	47,22	63,32
56	35,00	17,25	17,0	19,75	59,90	58,35	76,56
48	43,75	18,25	18,5	21,25	48,71	49,94	64,35
45	45,00	19,25	18,8	21,55	47,18	45,18	58,04
42	55,00	19,25	20,1	22,85	41,09	44,48	56,36
39	65,00	20,25	21,2	23,95	38,87	42,30	53,05
38	72,50	21,25	22,1	24,85	40,32	43,38	53,97
32	80,00	23,25	23,0	25,75	33,80	33,12	40,92
25	90,00	24,25	24,0	26,75	22,32	21,89	26,83
				$G_{0n}(N/m)$	52,12	45,34	61,31
				C. variação	0,326	0,202	0,238

QUADRO 7.26

Provete 1.8

Argamassa + Epóxido

Rotura mista argamassa

$B = 3,01\,cm$; $2h = 10,91\,cm$; $a_0 = 3,21\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
138	6,0	10,21	8,0	9,41	71,13	49,02	62,57
116	8,5	12,21	9,6	11,01	67,36	45,60	56,76
108	13,0	16,21	11,6	13,01	95,36	53,61	65,00
104	18,5	16,21	13,3	14,71	88,43	62,59	74,51
102	22,0	16,21	14,3	15,71	85,06	68,23	80,46
101	27,0	17,21	15,5	16,91	92,82	77,04	89,94
95	32,0	17,21	16,6	18,01	82,12	76,98	89,13
92	37,5	21,21	17,6	19,01	112,70	80,18	92,20
103	49,5	21,21	19,3	20,71	141,26	118,80	135,19
84	58,5	21,21	20,6	22,01	93,95	89,04	100,61
80	62,0	24,21	20,9	22,31	108,97	82,94	93,58
81	69,5	24,21	21,8	23,21	111,71	91,91	103,25
86	87,0	28,21	23,8	25,21	167,95	121,98	135,86
				$G_{0m}(N/m)$	101,45	78,30	90,70
				C. variação	0,275	0,303	0,271

QUADRO 7.27

Provete 1.9

Argamassa + Epóxido

Rotura mista argamassa

$B = 3,04\,cm$; $2h = 10,87\,cm$; $a_0 = 2,93\,cm$

P	C	$a\ (cm)$			$G_0(N/m)$		
(daN)	(cm/MN)	E. acústica	Complacência	Deflectómetro	E. acústica	Complacência	Deflectómetro
94	10,5	11,93	10,1	11,93	42,13	32,12	42,13
73	16,0	13,93	12,5	14,33	33,06	27,48	34,73
70	21,0	13,93	14,1	15,93	30,40	31,05	38,46
64	26,5	18,93	15,3	17,13	43,84	29,93	36,59
64	29,0	18,93	15,9	17,73	43,84	32,04	38,93
60	35,5	26,93	17,1	18,93	74,14	32,06	38,53
57	38,0	26,93	17,6	19,43	66,91	30,48	36,47
51	45,5	26,93	18,7	20,53	53,57	27,23	32,29
51	55,0	28,93	20,1	21,93	61,39	31,06	36,48
44	60,0	28,93	20,7	22,53	45,66	24,40	28,54
41	67,5	31,00	21,4	23,23	45,22	22,53	26,24
39	76,5	31,00	22,4	24,23	40,91	22,19	25,68
34	92,0	31,00	24,2	26,03	31,10	19,47	22,33
33	97,0	31,00	24,7	26,53	29,29	19,06	21,80
				$G_{0m}(N/m)$	45,82	27,22	32,80
				C. variação	0,302	0,176	0,203

Verifica-se que de uma forma geral os coeficientes de variação são inferiores quando nos cálculos de G_0 se utilizou o comprimento de fissura dado pelo método da complacência. Apenas no provete 1.8 (Quadro 7.26) o coeficiente de variação da complacência, $0,303$ é superior ao da emissão acústica, $0,275$. Em alguns provetes, 1.1 (Quadro 7.19) e 1.8 (Quadro 7.26) os coeficientes de variação dados pelo deflectómetro são inferiores aos dados pela complacência. Assim, podemos dizer que o método mais fiável é o da complacência porque, de uma maneira geral, é o que conduz a menores coeficientes de variação. Por este motivo os nossos comentários seguintes dizem respeito unicamente a esse método.

Para roturas na argamassa, provetes 1.5 a 1.7 (Quadros 7.23 a 7.25), o valor médio da taxa de libertação da energia de deformação a velocidade nula, G_0 é de $40,63\ N/m$.

7.4.4.2 Série de ensaios no. 2

As curvas obtidas durante os ensaios apresentam-se no Anexo 5.

Nos Quadros 7.28 a 7.34 apresentam-se os cálculos do comprimento da fissura, a e das taxas de libertação da energia de deformação, G.

QUADRO 7.28

Provete 2.1

Argamassa

$B = 2,99\,cm$; $W = 1,55\,cm$; $h = 5,51\,cm$; $a_0 = 3,53\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
87	4,60	6,8	30,14	0,015
83	6,30	8,0	34,44	0,015
69	7,50	8,9	27,89	0,015
102	8,00	9,2	64,10	10,000
		$G_0(N/m)$	30,82	

Com a velocidade de ensaio mais baixa, $0,015\ mm/min$ e com as paragens da máquina de tracção durante 15 minutos, ao fim de cada ciclo, determina-se a taxa de libertação de energia de deformação a velocidade de propagação nula, G_0. Com

as velocidades de ensaio mais elevadas entre 1 e 30 mm/min pretende avaliar-se a taxa crítica de libertação da energia de deformação, G_c. O valor médio de G_0 é de $77,61\ N/m$ para roturas na argamassa, provetes 2.1, 2.2 e 2.7 (Quadros 7.28, 7.29 e 7.34). Para roturas do tipo misto, restantes provetes, obtemos para G_0 o valor de $36,85\ N/m$. Estes valores estão muito próximos dos encontrados na série de ensaios no. 1.

QUADRO 7.29

Provete 2.2
Argamassa
$B = 3,05\,cm$; $W = 1,51\,cm$; $h = 5,49\,cm$; $a_0 = 3,11\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
113	5,90	7,8	63,17	0,015
110	7,00	8,3	65,53	0,015
126	10,60	10,2	118,02	0,015
120	11,30	10,5	112,13	0,015
150	11,30	10,5	175,21	20,000
		$G_0(N/m)$	89,71	

QUADRO 7.30

Provete 2.3
Argamassa + Epóxido
Rotura mista argamassa
$B = 3,05\,cm$; $W = 1,54\,cm$; $h = 5,44\,cm$; $a_0 = 3,87\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
81	2,50	4,5	16,14	0,015
46	11,00	10,4	15,91	0,015
56	19,01	13,3	35,47	0,015
59	19,01	13,3	39,37	1,000
		$G_0(N/m)$	22,51	

QUADRO 7.31

Provete 2.4
Argamassa + Epóxido
Rotura mista adesiva
$B = 3,03\,cm$; $W = 1,39\,cm$; $h = 5,44\,cm$; $a_0 = 3,86\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
72	6,20	8,0	28,90	0,015
76	8,80	9,6	42,39	0,015
73	13,50	11,7	53,80	0,015
61	17,61	12,9	44,26	0,015
89	18,48	13,2	97,99	3,000
		$G_0(N/m)$	42,34	

QUADRO 7.32

Provete 2.5
Argamassa + Epóxido
Rotura mista adesiva
$B = 3,07\,cm$; $W = 1,64\,cm$; $h = 5,49\,cm$; $a_0 = 2,86\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
85	6,50	8,0	34,13	0,015
83	7,90	8,5	35,59	0,015
38	28,99	15,8	20,71	0,015
44	30,00	16,2	29,02	10,000
		$G_0(N/m)$	30,14	

QUADRO 7.33

Provete 2.6
Argamassa + Epóxido
Rotura mista adesiva
$B = 3,02\,cm$; $W = 1,59\,cm$; $h = 5,47\,cm$; $a_0 = 2,58\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
109	5,70	7,5	52,79	0,015
85	10,50	10,2	53,43	0,015
83	11,00	10,5	50,95	0,015
120	11,49	10,8	111,45	15,000
		$G_0(N/m)$	52,39	

QUADRO 7.34

Provete 2.7
Argamassa + Epóxido
Rotura argamassa
$B = 3,05\,cm$; $W = 1,38\,cm$; $h = 5,52\,cm$; $a_0 = 3,14\,cm$

P (daN)	C (cm/MN)	a (cm)	G (N/m)	Velocidade do ensaio (mm/min)
145	6,80	8,2	122,38	0,015
130	8,00	9,0	113,08	0,015
116	9,50	9,8	102,74	0,015
145	10,00	10,0	165,72	30,000
		$G_0(N/m)$	112,73	

Em relação a G_c os pontos obtidos representam-se na figura 7.43. O número de pontos não é suficiente para se estabelecer com exactidão a partir de que velocidade de ensaio se verifica a estabilização . Em todo o caso, nota-se uma tendência para a formação de um patamar para velocidades entre 20 e 30 mm/min. Sugerimos que a determinação de G_c se faça a uma velocidade de 30 mm/min. Os valores estimados para G_c são de 179,00 N/m para roturas na argamassa e de 158,00 N/m para roturas mistas.

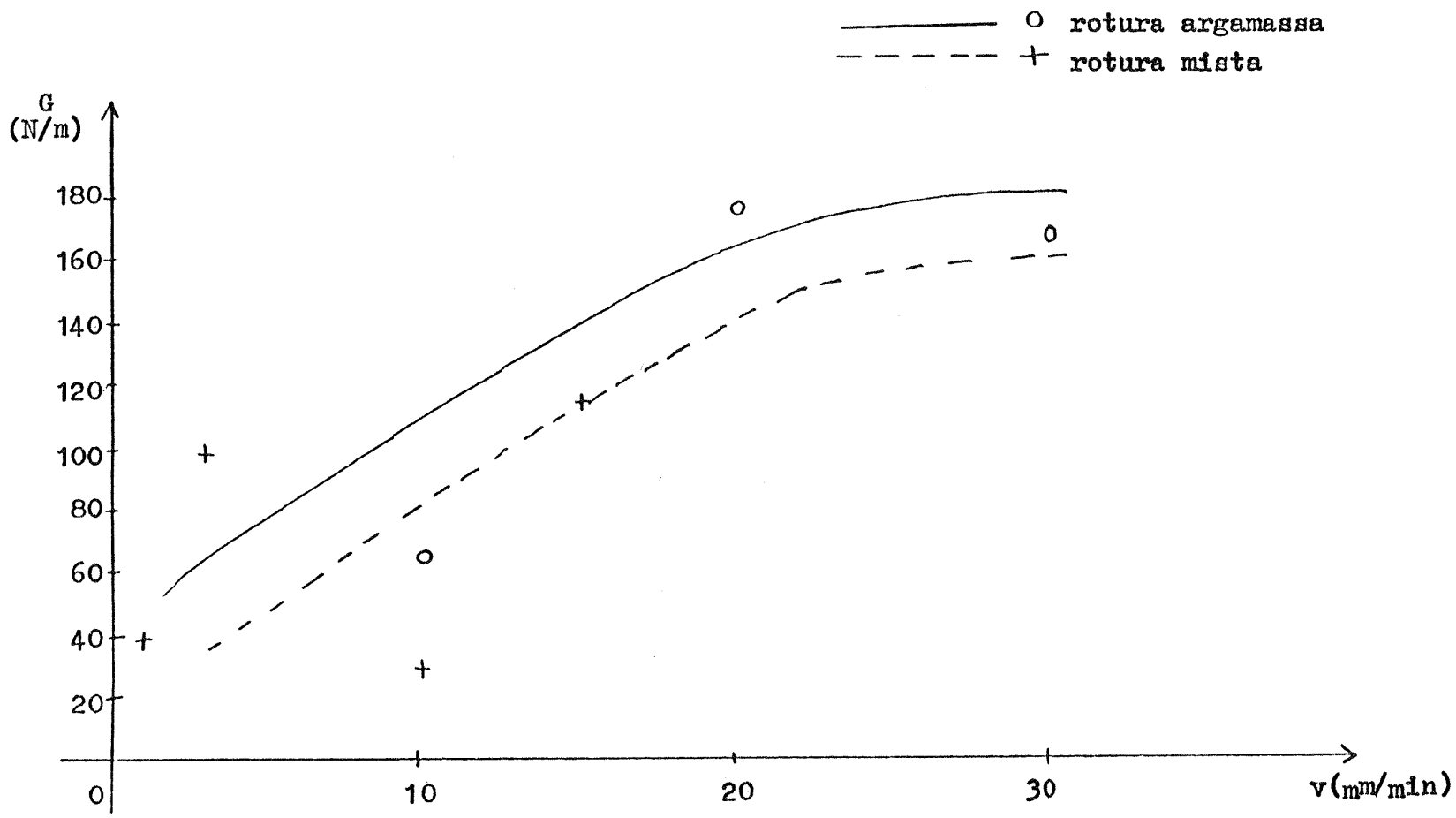


Fig. 7.43 - *Variação da taxa crítica de libertação da energia de deformação com a velocidade do ensaio.*

Conclusão

No decurso do nosso estudo experimental, interessamo-nos pela análise das ligações por colagem entre betão e epóxidos. Estudámos, em primeiro lugar, a influência da humidade, presente nas superfícies a colar, sobre a resistência da ligação.

O estudo das propriedades dos epóxidos permite concluir o seguinte:

— a quantidade de carga que é possível incorporar a um epóxido depende da granulometria e da natureza da carga. Quanto mais fina for a carga mineral, menor quantidade é possível incorporar aos epóxidos. É possível incorporar maior quantidade de uma carga calcária do que de um carga siliciosa com a mesma superfície específica;

— a presença da carga num epóxido torna o polímero mais viscoso, reduz a sua molhabilidade, aumenta o seu módulo de elasticidade, provoca um abrandamento do processo de polimerização e aumenta a sua capacidade de absorção de água;

— a presença da carga mineral num epóxido não tem influência sobre a sua resistência à tracção;

— a quantidade de água absorvida por um epóxido pode conduzir a uma diminuição significativa da resistência à tracção do polímero. No entanto, para pequenas quantidades de água absorvida a resistência à tracção é mesmo superior à do polímero sem água absorvida.

O estudo mecânico da resistência das ligações betão / epóxido com suporte húmido permite concluir o seguinte:

— é possível obter boas aderências, com espessura da junta adesiva de $0,6\ mm$, quer com cargas calcárias quer com cargas siliciosas, desde que seja adicionada ao epóxido uma determinada quantidade de carga. As dosagens de carga que correspondem às resistências óptimas são bem definidas para cada tipo de carga e granulometria e a utilização de dosagens diferentes conduz, geralmente, a reduções significativas da resistência à tracção;

— para as granulometrias ultrafina e fina são as cargas calcárias que apresentam melhores aderências. Se a granulometria for média a situação inverte-se e passam a obter-se melhores aderências com as cargas siliciosas;

— a aderência é função da espessura da junta. Se a carga utilizada for de origem calcária, a partir de uma certa espessura é possível obter boas colagens que se mantêm à medida que a espessura aumenta. As espessuras mínimas variaram, para os epóxidos utilizados, entre $0,1$ e $1,5\ mm$. Se a carga utilizada for de natureza siliciosa as boas aderências não são sempre possíveis e quando o são, verificam-se

num intervalo de espessuras de pequena amplitude, na proximidade de 1 mm;

— adicionando cimento aos epóxidos é possível a obtenção de boas aderências e da mesma forma que para as cargas inertes verifica-se a existência de uma dosagem de cimento óptima do ponto de vista da resistência da ligação.

A avaliação da resistência das ligações betão / epóxido com ensaios da mecânica da fractura, permite concluir o seguinte:

— é possível a aplicação da mecânica da fractura ao estudo das ligações betão / epóxido. Para este estudo devem utilizar-se provetes do tipo DCB porque possuem um maior comprimento para a propagação da fissura. Dos três métodos utilizados para determinação do comprimento das fissuras foi o da complacência o que conduziu a melhores resultados;

— para os casos estudados foi possível determinar a taxa de libertação da energia de deformação a velocidade de propagação nula, G_0 e a taxa crítica de libertação da energia de deformação, G_c. Os valores médios de G_0 são de $69,77\ N/m$ para roturas na argamassa e de $38,74\ N/m$ para roturas do tipo misto. Os valores médios de G_c são de $179,00\ N/m$ para roturas na argamassa e de $158,00\ N/m$ para roturas mistas.

A comparação com o estudo através de ensaios de tracção directa permite afirmar que o estudo pela mecânica da fractura é mais selectivo. Verificou-se que um epóxido que tinha conduzido a roturas no betão com ensaios de tracção directa, conduziu a uma maior percentagem de roturas mistas com a mecânica da fractura apesar da superfície do betão no momento da colagem se apresentar seca. Isto explica-se pela concentração de tensões ao nível da interface.

Outros trabalhos e investigações são necessários para completar o estudo efectuado nomeadamente determinar as leis de variação de G_0 e G_c com o estado de superfície da argamassa, com a natureza do epóxido, com a espessura da junta adesiva e com o tipo e granulometria da carga. Um outro estudo com interesse é o efeito das variações de temperatura ambiente sobre o comportamento mecânico das ligações betão / epóxido.

Referências

[1] Companhia Nacional de Petroquímica E.P.; *Divisão de Polímeros, Os plásticos na construção civil*, Lisboa, 1983.

[2] Sampaio J. C., *Materiais de construção, Laboratório de Ensaio de Materiais*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1978.

[3] Smith R.C., *Materials of construction*, McGraw - Hill, 1973.

[4] Aguiar J.B., *Plásticos, Apontamentos do Curso para Técnicos de Materiais e Processos de Construção*, Universidade do Minho, Braga, 1987.

[5] Komar A., *Matériaux et éléments de construction*, Editions Mir, 1978.

[6] Ferreira V. e Farinha B., *Tabelas Técnicas para Engenharia Civil*, 8ª Edição, Associação dos Estudantes do I.S.T., Lisboa, 1977.

[7] Aguiar J. B., *Estudo da ligação adesiva, em meio húmido, entre sistemas epóxido e materiais hidraúlicos, Trabalho de síntese apresentado a Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica*, Universidade do Minho, Braga, 1986.

[8] Paillère A. M., *Guide pour le choix et l'application des produits de réparation des constructions en béton*, Annales ITBTP n^o 349, Avril 1977.

[9] Ghellal S., *Étude de la liaison adhésive entre mortier et résine époxyde, en utilisant les principes de la mécanique de la rupture*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, França, 1987.

[10] Aguiar J. B., *Aplicação de polímeros epóxido na reparação, protecção e colagem de elementos de betão*, Relatório de aula teórico-prática apresentado a Provas de A.P.C.C., Universidade do Minho, Braga, 1986.

[11] Lamouri R., *Analyse de la liaison adhésive entre un liant époxydique et le béton hydraulique*, Thèse présentée à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, France, Juin 1984.

[12] Troncy M., *Étude de la liaison adhésive entre un liant époxydique et le béton*, Mémoire présenté à l'Université de Clermont II, Aubière, Juin 1985.

[13] Schulze W. et Munse M., *Caractérisation de la surface du béton considérée dans le cas d'une liaison béton / résine synthétique*, Matériaux et Constructions, Vol. 11, n^o. 63.

[14] Tatraux-Paro J. - M. et Bismuth W., *Vérification par des méthodes statiques et dynamiques de la théorie de l'adhésion sur des phénomènes de rupture*, Rhéol. Acta, Vol. 13, N^o. 2, 1974, 233 - 235.

[15] Sharpe L. et Shanhorm H., *Chem. Eng. News*, 41, n^o. 564, 1972.

[16] Mevrel R., Ponlard S., Dumiel J. et Vignollet M., *Tensions de surface et adhésivité*, Rhéol. Acta, Vol. 13, n^o. 2, 1974, 318 - 322.

[17] *Introdução ao estudo e ensaio de colas orgânicas*, Circular de informação técnica n^o. 34, LNEC, Agosto de 1973.

[18] Van Vlack L. H., *Princípios de ciência dos materiais*, Edgard Blücher, Brasil, 1970.

[19] Aouwink and Salomon, *Adhesion and adhesives*, Vol. 1, Elsevier Ed., Amsterdam, 1966.

[20] Borreill J., *Étude de la réticulation isotherme, en présence et en absence d'eau, de quelques liants époxydiques utilisés pour la réparation des bétons hydrauliques*, Rapport de recherche LCPC n^o. 124, Septembre 1983.

[21] *Procedure et epreuve d'evaluation des produits de réparation des structures en béton*, Essais d'identification, Projects de modes opératoires, LCPC, Juin 1983.

[22] *Réparation des parements en béton, produits et techniques actuels*, Note d'information téchnique, LCPC, 1985.

[23] ACI Standard 503.1-79 — *Standard Specification for Bonding Hardened Concrete, Steel, Wood, Brick and Other Materials to Hardened Concrete with a Multi - Component Epoxy Adhesive.*

[24] ACI Standard 503.2-79 — *Standard Specification for Bonding Plastic Concrete to Hardened Concrete With a Multi - Component Epoxy Adhesive.*

[25] ACI Standard 503.3-79 — *Standard Specification for Producing a Skid - Resistant Surface on Concrete by the Use of a Multi - Component Epoxy System.*

[26] ACI Standard 503.4-79 — *Standard Specification for Repairing Concrete with Epoxy Mortars.*

[27] Paillère A. M. et Rizoulières Y., *Procedure et Epreuve d'Evaluation de la Qualité des Produits de Réparation des Structures en Béton*, International Symposium, Liége 1984, *Future for Plastics in Building and in Civil Engineering.*

[28] ASTM C883-83, *Standard Specification for Epoxy-Resin-Base Bonding Systems for Concrete.*

[29] *Methodes d'essai pour mésurer les propriétés d'adhérence des matériaux à base de resines et du béton*, Project de recommandations, RILEM, Septembre 1986.

[30] Griffith A. A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Phil Trans. R. Soc., London Séries A221 (1920) p.p. 163-198.

[31] Inglis C. E., *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*, Trans. inst. archit., Vol. 55, London, 1913.

[32] Bui H. D., *Mécanique de la rupture fragile*, Ed. Masson, Paris, 1978.

[33] Marchand J. P., *La mécanique de la rupture appliqueé aux chaussées*, Thése presentée à l'École National des Ponts et Chaussées, Paris, 1984.

[34] Barquins M., *Mécanique de la rupture: Modéle de Représentation des Propagations Subcritique et Catastrophique*, Colloque CNRS, Grenoble, 1985.

[35] Maugis D., *Adhérence and Fracture Mechanics*, in Fundamentals of Adhesion, Plenum Press, 1987.

[36] Mandel J., *Propriétés mécaniques des matériaux*, Ed. Eyrolles, Paris, 1978.

[37] Goodier J. N., *Mathematical theory of equilibrum cracks, Fracture II*, H. Liebowitz Editor, Acad. Press, 1968.

[38] Westergaard H. M., *Bearing pressures and cracks*, Trans. ASME, Journal of applied mechanics, Vol. 61, 1939, p.p. 49-53.

[39] Muskelishvili N. I., *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*, Noordhoff Editor, 1953.

[40] Broek D., *Elementary engineering fracture mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

[41] Hofer Jr. K. E., *Equations for fracture mechanics*, Machine design, Vol. 40, n^o. 3, fév. 1968, p.p. 109-115.

[42] Táda H., *The stress analysis of cracks handbook*, Del Research Corporation, Hellertown, Pensylvania, 1973.

[43] Irwin G. R., *Fracturing of metals*, ASM, Cleveland Ohio, 1949.

[44] Irwin G. R., *Fracture Mechanics*, Proc. of the first Symposium on naval structural mechanics, Pergamon Press, 1958, p.p. 557-591.

[45] ASTM E 399-83, *Standard Test Method for Plane - Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.*

[46] Erdogan F. and Sih G. C., *On the crack extension in brittle solids under general loading*, Mechanics of today, Vol. 4, Pergamon Press, 1963.

[47] Orowan E., *Fundamentals of brittle behaviour of metals, Fatigue and fracture of metals*, John Wiley Ed., New York, 1952.

[48] Maugis D., *Review Subcritical crack growth, surface energy, fracture toughness, stick-slip and embrittlement*, Journal of Materials Science, 20, 1985, p.p. 3041--3073.

[49] Maugis D., *Adherence of elastomers: Fracture mechanics aspects*, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 1, N^o. 2, 1987, p.p. 105-134.

[50] Maugis D., *Adhérence des solides*, Séminaire Adhérence Polymeres-Béton, Saint - Rémy - les - Chèvreuse, 1985.

[51] Maugis D. and Barquins M., in: *Adhesion and Adsorption of Polymers*, L. H. Lee (Ed.) part A, p.p. 203-277, Plenum Press, New York, 1980.

[52] Gurney G. and Hunt J., *Proc. Roy. Soc.*, A229, 508-524, 1967.

[53] Maugis D., *Adherence of solides*, Proceedings of the international congress on Microscopic aspects of adhesion and lubrification, Paris, 1981, p.p. 221-252.

[54] Maugis D., Barquins M., J. Phis. D11, 1978, p.p. 1989-2023.

[55] Ferry J. D., *Viscoelastic Properties of Polymers*, Wiley, New York, 1970.

[56] Barenblatt G. I., *Mathematical theory of equilibrium cracks in buttle fracture*, Advances in applied mechanics, Vol. III, Acad. Press, 1962.

[57] Knott J. F., *Fundamentals of fractures mechanics*, Butteworths, London, 1976.

[58] Rice J., *A path independant integral and the aproximate analysis of strain concentation by notches and cracks*, Journal of applied mechanics, Vol. 35, 1968, p.p. 379-386.

[59] Rice J., *Mathematical analysis in the mechanics of fracture*, Fracture II, H. Liebowitz Editor, Acad. Press, 1968.

[60] Irwin G. R., *Plastic zone near a crack and fracture toughness*, Proc. 7^{th} Sagamor Conf., Syracuse Univ. août. 1960.

[61] Mc Clintock F. A., Irwin G. R., *Plasticity aspects of fracture mechanics*, ASTM STP n^o. 381, 1964, p.p. 84-113.

[62] Paris P. C., Sih G. C., *Stress analysis of cracks*, ASTM STP n^o. 381, 1964, p.p. 30-83.

[63] Dugdale D. S., *Yielding of steel sleets containing slits*, Journal of the mechanics and phisics of solids, Vol. 8, 1960.

[64] Dubois M., *Introduction à la mécanique de la rupture*, Note tecnique n^o. 4 du CETIM, 1973.

[65] Duffy A. R. et al, *Fracture design pratice for pressure piping*, Fracture I, p.p. 159-232, Liebowitz ed., Academic Press, 1969.

[66] Rooke D. P., *Elastic yield zone round a crack tip*, Royal Aircr. Est., Farnborough, Tech. Note CPM 29, 1963.

[67] Martins J. B., *Métodos Numéricos*, Universidade do Minho, 1988.

[68] Martin H. C. and Carey G. F., *Introduction to finite element analysis*, Theory and application, Mc Graw Hill, 1973.

[69] Turner M. J. and all, *Stiffness and deflection analysis of complex structures*, J. aéro. Sci., Vol. 23, 1956, p.p. 805-823.

[70] Bathe K. J., *Finite element procedure in engineering analysis*, Prentice Hall, 1982.

[71] Zienkiewiez O. C., *The finite element method in engineering science*, Mc Graw-Hill, 1971.

[72] Guellec P., *La méthode des éléments finis et ses applications aux problémes de génie civil*, Rapport de recherche n^o. 8, LCPC, sept. 1970.

[73] Guellec P., *La méthod des éléments finis. Téchnique de calcul et diverses applications*, Bull. Liaison des P. et Ch., Spécial S, avril 1972, p.p. 46-73.

[74] Belkeziz A. e Magnan J. P., *Analyse numérique de la consolidation bidimensionnelle des sols élastoplastiques*, Rapport de recherche n^o. 115, LCPC, Juill. 1982.

[75] Zienkiewicz O. C., *The Finite Element Method*, Mc Graw - Hill, 1977.

[76] Lachat J. C. et Watson J. O., *Application de la méthode des équations intégrales au calcul des structures*, Mémoires techniques du CETIM, n^o. 25, mars 1976.

[77] Jaswon M. A. et Symm G. T., *Integral equations methods in potencial theory and elastostatics*, Academic Press, 1977.

[78] Brebbia C. A., *The boundary element method for engineers*, Pentech Press, London, 1984.

[79] Heliot J., Labbens R. and Pelissier Tanon A., *Solution of three dimensional crack problems using the boundary integral equation method*, Proceedings of the second international conférence of numerical methods in fractures mechanics, Pineridge Press, p.p. 107-121.

[80] Athanassiadis A., *Stabilité, ténacité, propagation des fissures dans les fils et barres en acier*, Rapport de recherche LPC n^o. 99, sept. 1979.

[81] Boissenot J. M., Lachat J. C. et Watson J. O., *Étude par équations intégrales d'une éprouvette CT 15*, Revue de physique appliquée, tome 9, Juil. 1974, p.p. 611-615.

[82] Blandfort G. E., *Two dimensional stress intensity factor computations using the boundary element method*, Int. J. Num. meth. eng., Vol. 17, 1981, p.p. 387-404.

[83] Cruse T. A., *Numerical solutions in three dimensional elastostatics*, Int. Journal Solids Structures, Vol. 5, 1969, p.p. 1259-1274.

[84] Dubois M. and Lachat J. C., *The integral formulation of boundary value problems, Variational methods in engineering*, University of Southampton, 1972, p.p. 9/89-9/109.

[85] Cruse T. A., *Aplication of the boundary - integral equation method to three dimensional stress analysis, Computers and Structures*, Vol. 3, 1973, p.p. 509-527.

[86] Owen D. R. J. and Fawkes A. J., *Engineering Fracture Mechanics: Numerical Methods and Applications*, Pineridge Press Ltd., Swansea, U. K., 1983.

[87] Chan S. K., Tuba I. S. and Wilson W. K., *On the finite element method in linear fracture mechanics, Engineering Fracture Mechanics 2*, 1970, p.p. 1-17.

[88] Kobayashi A., Maiden D., Simon B. and Iida S., *Application of the method of finite element analysis to two-dimensional problems in fracture mechanics*, Paper 69 WA-PVP-12, ASME Winter Annual Meeting, November 1969.

[89] Tracey D. M., *Finite elements for determination of crack tip elastic stress intensity factors*, Engineering Fracture Mechanics, 3, 1971, p.p. 255-266.

[90] Tracey D. M. and Cook T. S., *Analysis of power type singularities using finite elements*, Int. J. Num. Meth. Eng., 11, n^o. 8, 1977, 1225-1235.

[91] Blackburn W. S., *Calculation of stress intensity factors at crack tips using special finite elements, in the Mathematics of Finite Elements*, J. R. Whiteman, Ed., Academic Press, N. Y., 1973, p.p. 327-336.

[92] Akin J. E., *The generation of elements with singularities*, Int. J. Num. Methods Eng. 10, n^o. 6, 1976, p.p. 1249-1260.

[93] Benzley S. E., *Representation of singularities with isoparametric finite elements*, Int. J. Num. Meth. Eng. 8, n°. 3, 1974, p.p. 537-545.

[94] Wilson W. K., *Combined mode fracture*, Ph. D. Thesis, University of Pittsburgh, 1969.

[95] Liebowitz H., *Fracture*, Vol. II, Academic Press, New York, 1968.

[96] Rao A. K., Raju I. and Krishna Murty A., *A powerful hybrid method in finite element analysis*, Int. J. Num. Meth. Eng., 3, 1971.

[97] Apostal M., *Development of an anisotropic singularity finite element utilizing the hybrid displacement method*, Ph. D. Thesis, State University of New York, 1974.

[98] Fawkes A. J., *Finite elements applied to crack tip singularities*, Ph. D. Thesis, University of Wales, 1976.

[99] Marques, J. M. C., *Desenvolvimento de um sistema de elementos finitos para a solução de problemas dinâmicos não lineares e a sua aplicação à análise sísmica de barragens*, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Estrutural, Universidade do Porto, Outubro de 1985.

[100] Morley L.S.D., *Finite element solution of boundary value problems with non-removable singularities*, Proc. R. Soc. London 275 A, 1973.

[101] Yamamoto Y., Tokudo N. and Sumi Y., *Finite element treatment of singularities of boundary value problems and its application to analysis of stress intensity factors*, Theory and Practice in Finite Element Structural Analysis, Yamada Y. and Gallegh R. H., Eds., University of Tokyo Press, 1973.

[102] Pian T. H. H., *Derivation of element stiffness matrices for assumed stress distributions*, J.A.I.A.A. 2, n^o. 7, July 1964.

[103] Pin Tong, Pian T. H. H. e Lasry S. J., *A hybrid element approach to crack problems in plane elasticity*, Int. J. Num. Meth. Eng. 7, 1973.

[104] Irons B. M., *An assumed stress version of the Wilson 8-node isoparametric brick*, Report n^o. CNME/CM/56, Dept. Civil Eng. University College, Swansea, May 1972.

[105] Pian T. H. H., *Finite element methods by variational principles with relaxed continuity requirements*, Proc. Int. Conf. on Variational Meth. Eng., C.A. Brebbia and H. Tottenham, Eds., University of Southampton, Sept. 1972.

[106] Washizu K., *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*, Pergamon Press, Oxford, 1968.

[107] Pian T. H. H., Pin Tong and Luk C. H., *Elastic crack analysis by a finite element hybrid method*, Proc 3rd Air Force Conf. on Matrix Methods in Struct. Mech., Dayton, Ohio, 1971.

[108] Brebbia C. A., *Critical evaluation of aproximate methods in mathematical modelling*, 1st Int. Conf. on Appl. Mathematical Modelling, St. Louis, Missouri, 1977.

[109] Neville A. M., Civ. Eng. (London), Vol. 54 (1959).

[110] Mindess S., *The Application of Fracture Mechanics to Cement and Concrete: A Historical Review*, in *Fracture Mechanics of Concrete*, Elsevier, 1983.

[111] Kaplan M. F., *Crack Propagation and the Fracture of Concrete*, J. Amer. Concr. Inst., 58 (1961), 591-610.

[112] AdHoc Committee, *Concrete Year 2000*, A.C.I. Journal, Vol. 68, n^o. 8, août 1971.

[113] Baron J., *Comportement du béton hydraulique: Fissurabilité et fragilité*, Rapport de Recherche LPC, n^o. 69, Octobre 1977.

[114] Freudenthal A. M., *The inelastic behaviour of engineering materials and structures*, Wiley, 1950.

[115] Benkirane M., *Propagation d'une fissure dans le béton précontraint*, Thése docteur-ingéneur, Université de Compiegne, 1982.

[116] Slate F. O. and Olsefski S., *X Rayons for study of internal structure and microcraking of concrete*, Journal of A.C.I., Proc. V. 60, n°. 5, May 1963, p.p. 575-588.

[117] Hsu T. T. C., Slate F. O., Sturman G. M. and Winter G., J. Amer Concr. Inst., 60, 1963, 209-224.

[118] Glucklich J., in A. E. Brooks and K. Newman (Eds), *Proc. Int. Conf. the Structure of Concrete*, London, Sept. 1965, 176-189.

[119] Dantu P., Annales de l'Inst. Tech. *Bat. et des Trav. Publ.*, 11, 1958, 55-77.

[120] Swamy R. N., in M. Teleni (Ed.), Proc. Southampton 1969 Civil Eng. Mat. Conf. Structure, Wiley - Interscience, p.p. 301-315.

[121] Kaplan M. F., *Strains and stresses of concrete at initiation of cracking and near failure*, Journal of ACI, Proc, V 60, *n°*. 7, 1963, 853-880.

[122] Evans R. H. and Marathe M. S., *Microcracking and stress - strain curves for concrete in tension*, Matériaux et Construction, RILEM, Vol. 1, Janvier--Février 1968, 61-64.

[123] Terrien M. et Berges J., *Fifth International Conference on Fracture*, Cannes, France, 1981, 2253-2260.

[124] Wittmann F. H. and Zaitsev Yu. V., *Fifth International Conference on Fracture*, Cannes, France, 1981, 2261-2274.

[125] Entov V. M. and Yagust V. I., *Experimental investigation of laws governing quasi static development of macrocracks in concrete*, I 2V. AN. SSSR, Meklmika, Tverdogo Tela, Vol. 10, *n°*. 4, 1975, p.p. 93-103.

[126] Rossi P., *Fissuration du béton: du matériau à la structure. Application de la mécanique linéaire de la rupture*, Rapport de recherche LPC *n°*. 150, Paris, 1988.

[127] Lott J. L. and Kesler C. E., *Crack propagation in plain concrete*, Symposium on structure of portland cement paste and concrete, Washington DC, Highway Research Board, 1966, Special Report 90, p.p. 204-218.

[128] Naus D. J. and Lott J. L., *Fracture toughness of portland cement concretes*, ACI *n°*. 6, Proc. v. 66, Juin 1969, p.p. 481-489.

[129] Gluckich J., *Fracture of plain concret*, Journal of the Eng. Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 89 *n°*. EM 6, Déc. 1963, p.p. 127-138.

[130] Moavenzadeh F. and Kuguel R., *Fracture of concrete*, Journal of materials, JMLSA, Vol. 4, n^o. 3, Sept. 1969, p.p. 497-519.

[131] Shah S. P. and Mc Garry F. J., *Griffith Fracture Criterion and Concrete*, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 97, n^o. EM6, Déc. 1970, p.p. 1663-1676.

[132] Brown E. T., Hudson J. A. et Marathe M. S., *Discussion de l'article de Shah et Mc Garry*, Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE, Vol. 98, n^o. EM5, Octobre 1972, p.p.1310-1313.

[133] Hillemeier B. and Hilsdorf H. K., *Fracture mechanics studies on concrete compounds*, Cement and Concrete Research, Vol. 7, 1977, p.p. 523-536.

[134] Brown J. H., *Measuring of fracture toughness of cement paste and mortars*, Mag. Concrete Research, Special Issue on Fracture, Vol. 3, n^o. 4, Juillet 1973, p.p. 475-480.

[135] Brown J. H. and Pomeroy C. D., *Fracture toughness of cement pastes and mortars*, Cement and Concrete Research, Special Issue on Fracture, Vol. 3, n^o. 4, Juillet 1973, p.p. 475-480.

[136] Kesler C. E., Naus D. J. and Lott J. L., *Fracture mechanics - applicability to concrete*, Proc. of the International Conference on Mechanics Behaviour of Materials, Vol. IV, Kyoto, 1971, p.p. 113-124.

[137] Romualdi J. P. and Balson G. B., *Mechanics of crack arrest in concrete*, Proc. of the American Society of Civil Engineers, Vol. 89, n^o. 6M3, Juin 1963, p.p. 147-168.

[138] Romualdi J. P. and Balson G. B., *Behaviour of reinforced concrete beams with closely spaced reinforcement*, Journal of ACI, Proc. Vol. 60, n^o. 6, Juin 1963, p.p. 775-790.

[139] Romualdi J. P. and Mandel J. A., *Tensile strenght of concrete affected by uniformly distributed and closely spaced short lengths of wire reinforcement*, ACI Proc., Vol. 61, n^o. 6, Juin 1964, p.p. 657-670.

[140] Shah S. P. and Rangan B. V., *Fiber reinforced concrete properties*, ACI Proc. Vol. 68, n^o. 2, Février 1971, p.p. 126-135.

[141] Welch G. B. and Haisman B., *The application of fracture mechanics to concrete and measurement of fracture toughness*, Matériaux et Constructions RILEM, Vol. 2, n^o. 9, Mai-Juin 1969.

[142] Carpinteri A., *Fifth International Conference on Fracture*, Cannes - France, 29 Mars - 3 Avril 1981, Vol. 4, p.p. 1491-1498.

[143] Hillerborg A. and Petersson P. E., *Fifth International Conference on Fracture*, Cannes - France, 29 Mars - 3 Avril 1981, Vol. 4, p.p. 1515-1522.

[144] Ripling E. J., Mostovoy S. and Patrick R. L., *Application of Fracture Mechanics to Adhesive Joints*, ASTM STP 360, American Soc. Testing Mats., 1964.

[145] Wang S. S., Mandell J. F. and McGarry F. J., *An analysis of the crack tip stress field in DCB adhesive fracture specimens*, International Journal of Fracture, Vol. 14, n^o. 1, February 1978, p.p. 39-58.

[146] Irwin G. R., *Journal Applied Mechanics*, Transactions of ASME, 24 (1957).

[147] Mostovoy S., Crosley P. B. and Ripling E. J., *Journal of Materials*, 2 (1967).

[148] Trantina G. G., *Fracture Mechanics Approach to Adhesive Joints*, T. & A. M. Report n^o. 350, Dept. of Theo. and Appl. Mech., Univ. of Illinois (1971).

[149] ASTM, D 3433-75, *Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Joints.*

[150] Mostovoy S., Ripling E. J. and Bersch C. F., *Fracture Toughness of Adhesive Joints*, J. Adhesion, Vol. 3, 1971, p.p. 125-144.

[151] Hine P. J., Muddanis S. El. and Packham D. E., *Adhesion of microfibrous surfaces on steel and copper to epoxy resins*, J. Adhesion Sci. Tech., Vol. 1, n^o. 1, 1987, p.p. 69-78.

[152] Handani D. and Coddet C., *Role of the loading rate in mode I opening on the mechanical behaviour of adhesive joints*, Mechanical behaviour of adhesive joints, S^{te}. Etienne, France, 1987, p.p. 223-235.

[153] Berry J. P., *Determination of fracture surface energies by the cleavage technique*, J. Appl. Phys., Vol. 34, 1963, p. 62.

[154] Wilkins D. J. and al, *Characterizing delamination growth in graphie - epoxy*, ASTM STP 775, 1982, p.p. 168-183.

[155] Paillère A. M., *L'évaluation de l'adhérence des polymères au béton*, Séminaire Saint - Rémy - les - Chevreuse, Oct. 1986.

[156] Drnevich and Gray, *Acoustic emissions in geotechnical engineering practice*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

[157] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, César presentation, Janvier 1989.

[158] Srawley J. E. and Gross B., *Stress intensity factors for Crackline-loaded edge--crack specimens*, Materials Research & Standards, Vol. 7, n^o. 4, April 1967, p.p. 155-162.

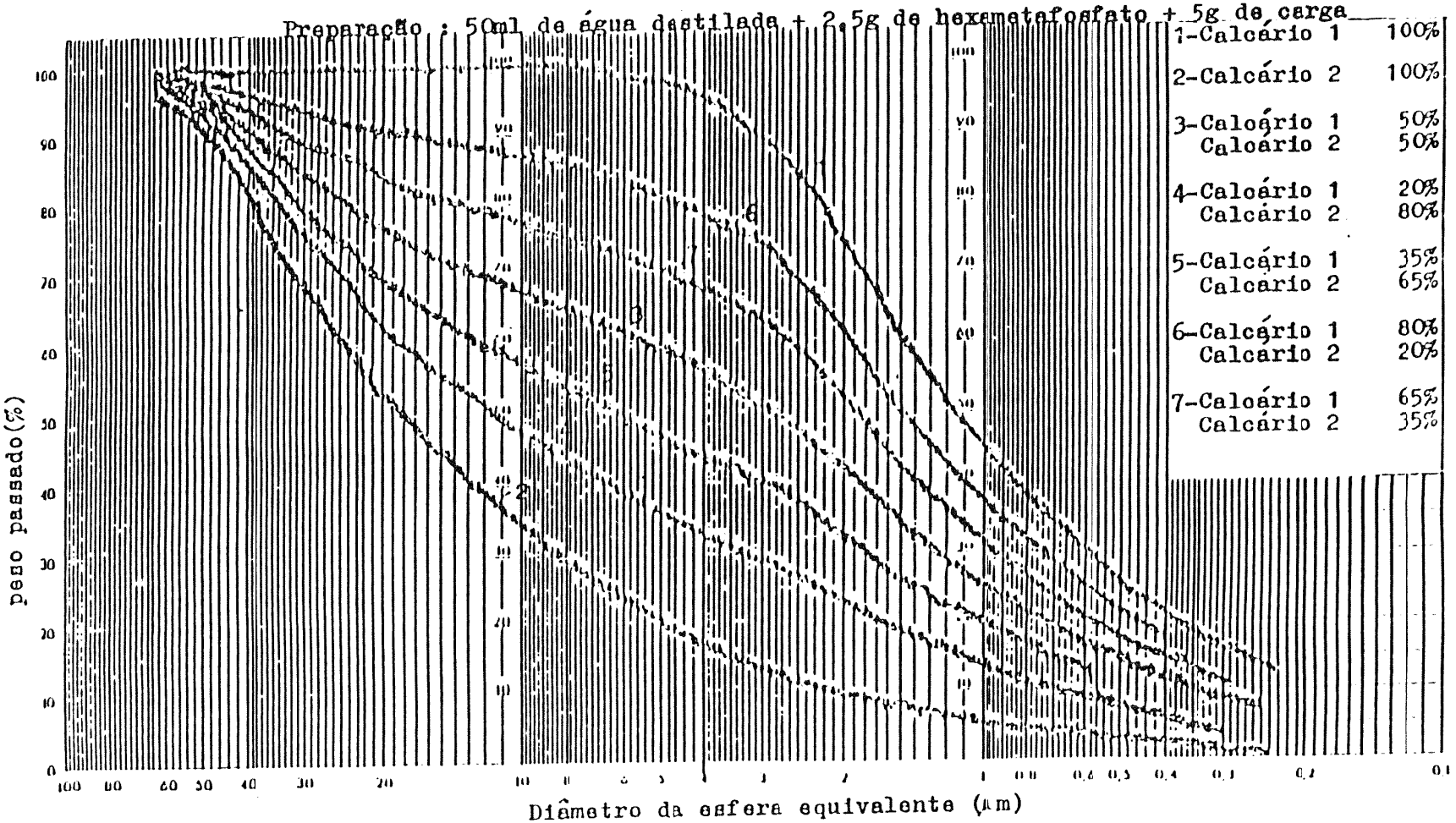
— ANEXO 1 —

— CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS CARGAS CALCÁRIAS —

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Cargas calcárias

Preparação : 50ml de água destilada + 2,5g de hexametafosfato + 5g de carga



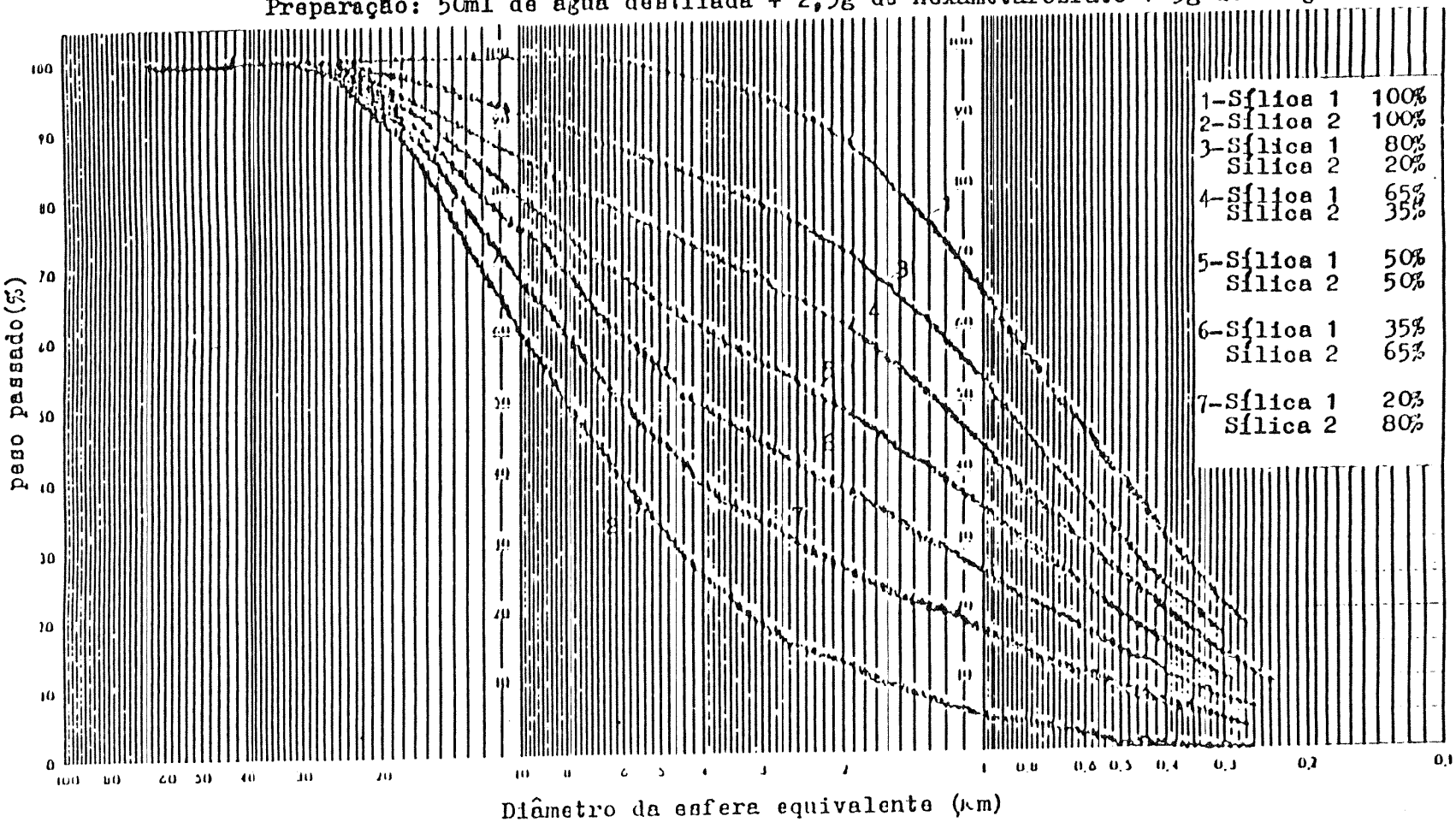
— ANEXO 2 —

— CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS CARGAS SILICIOSAS —

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Cargas siliciosas

Preparação: 50ml de água destilada + 2,5g de hexametafosfato + 5g de carga

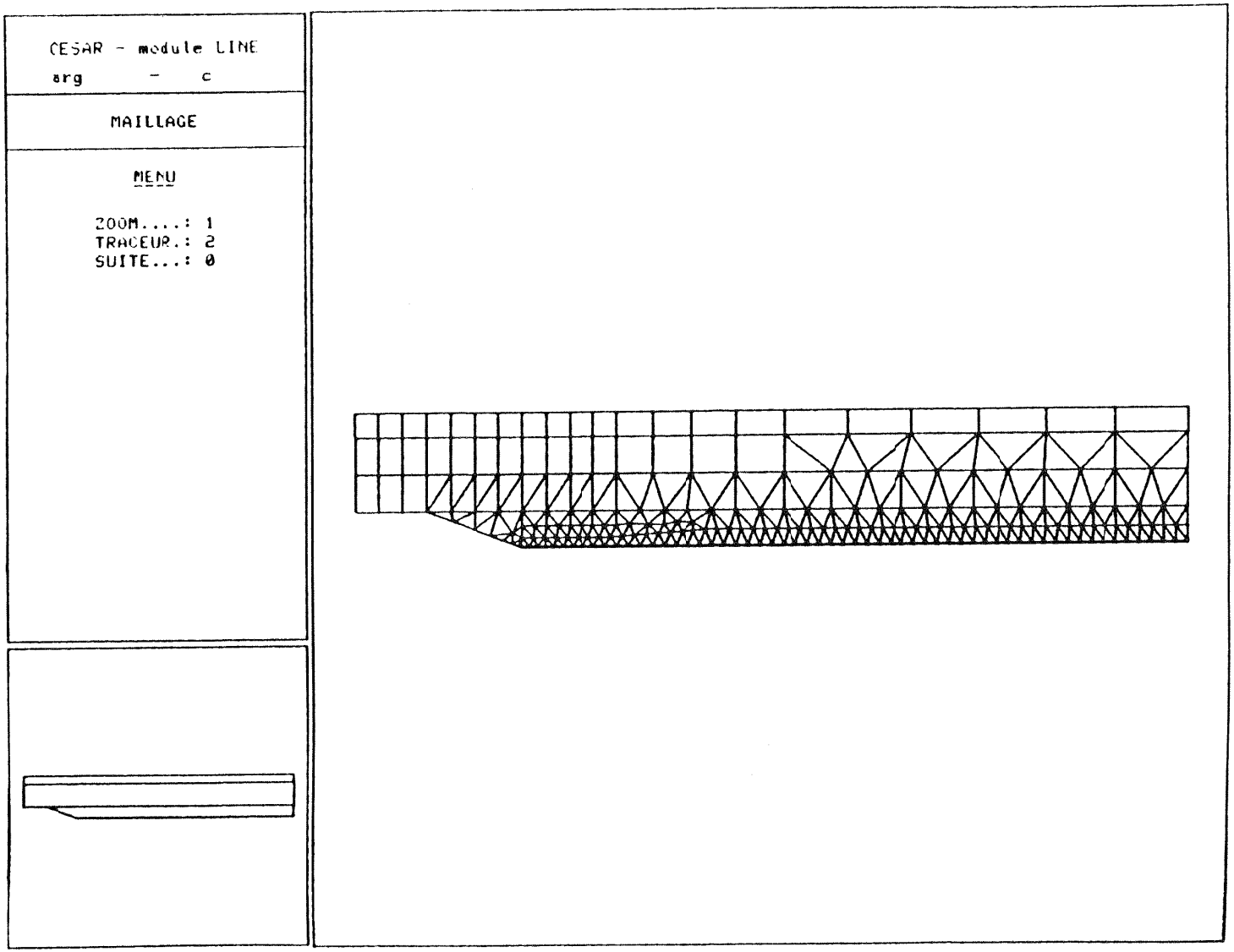


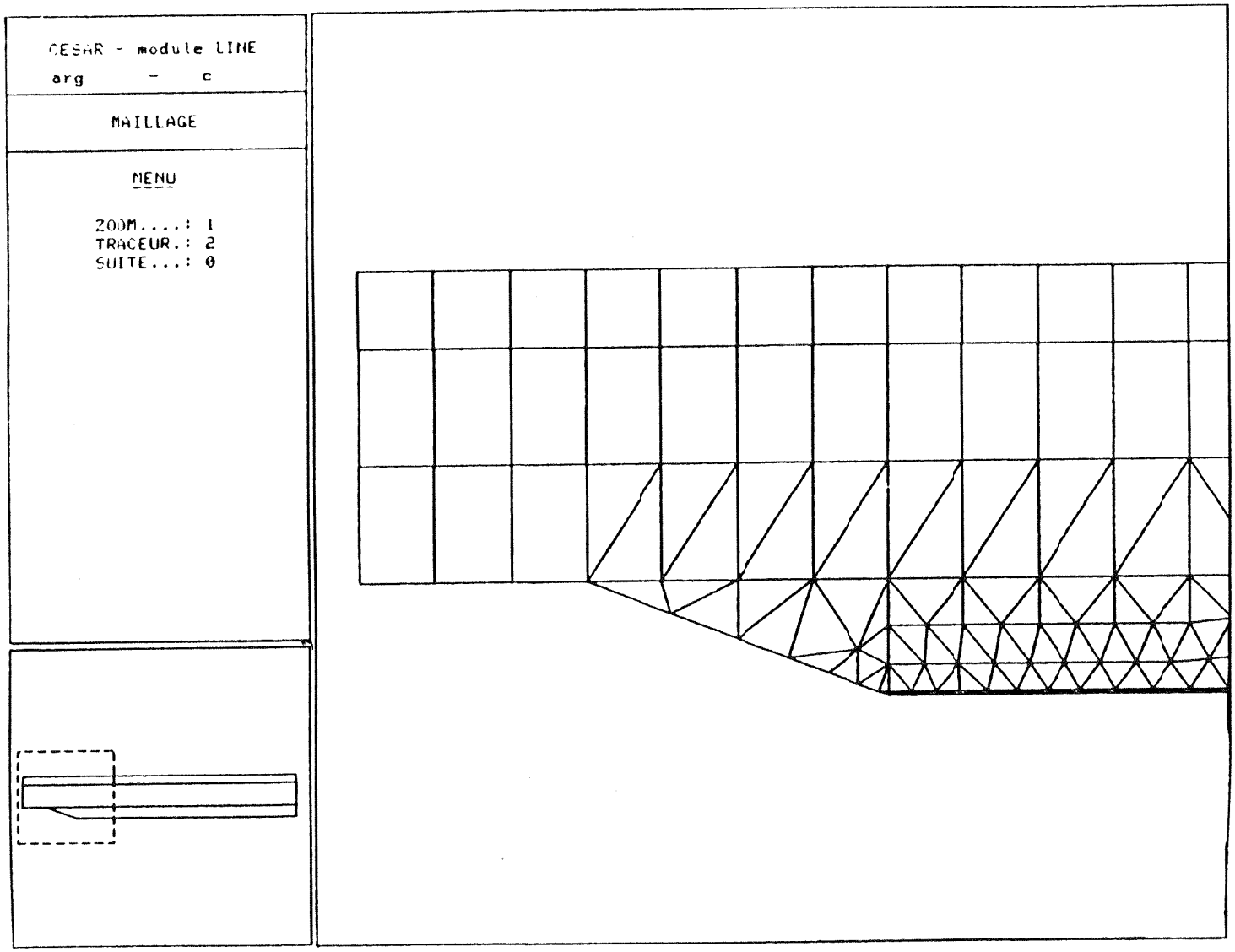
— ANEXO 3 —

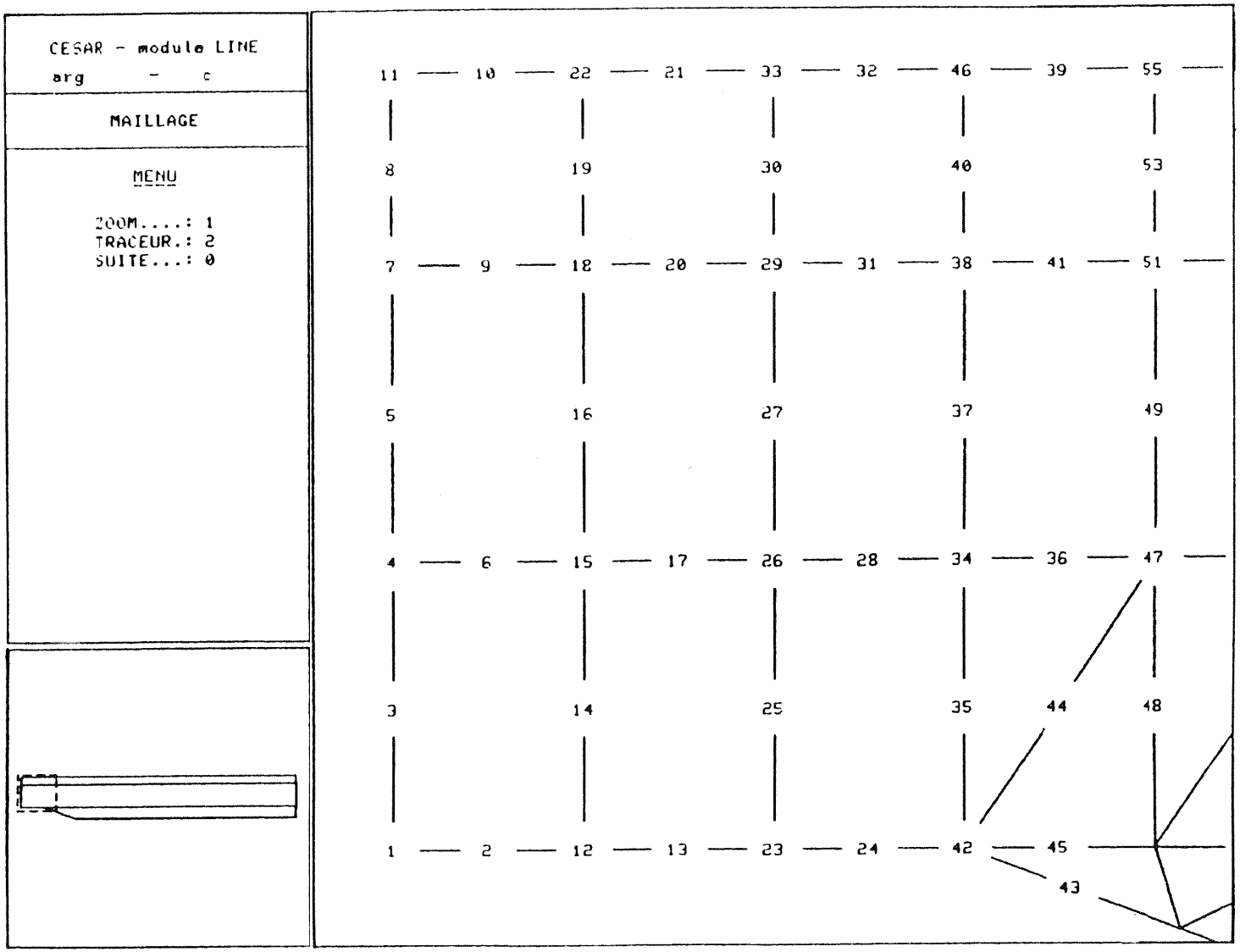
— ESTUDOS COM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS —

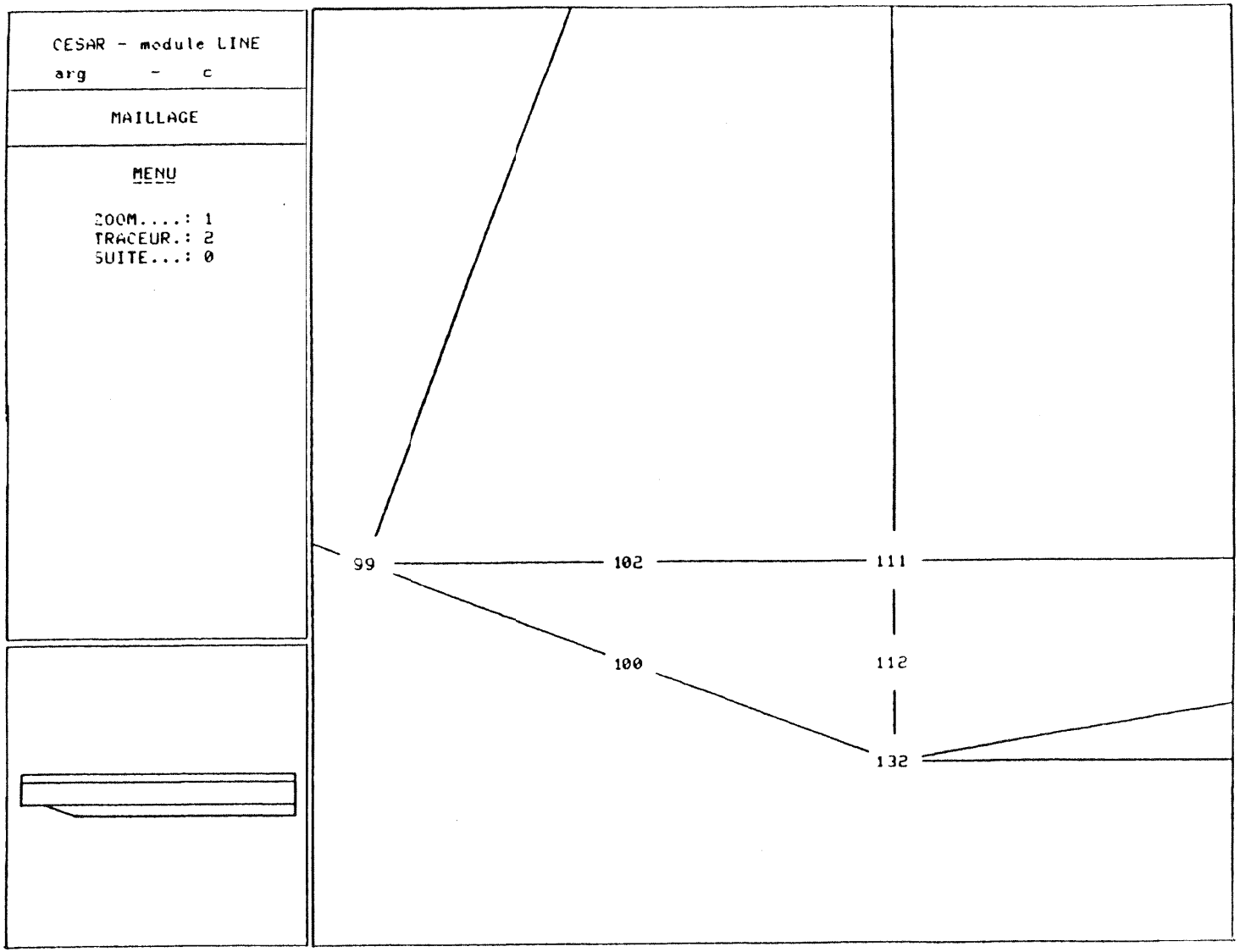
— ANEXO 3.1 —

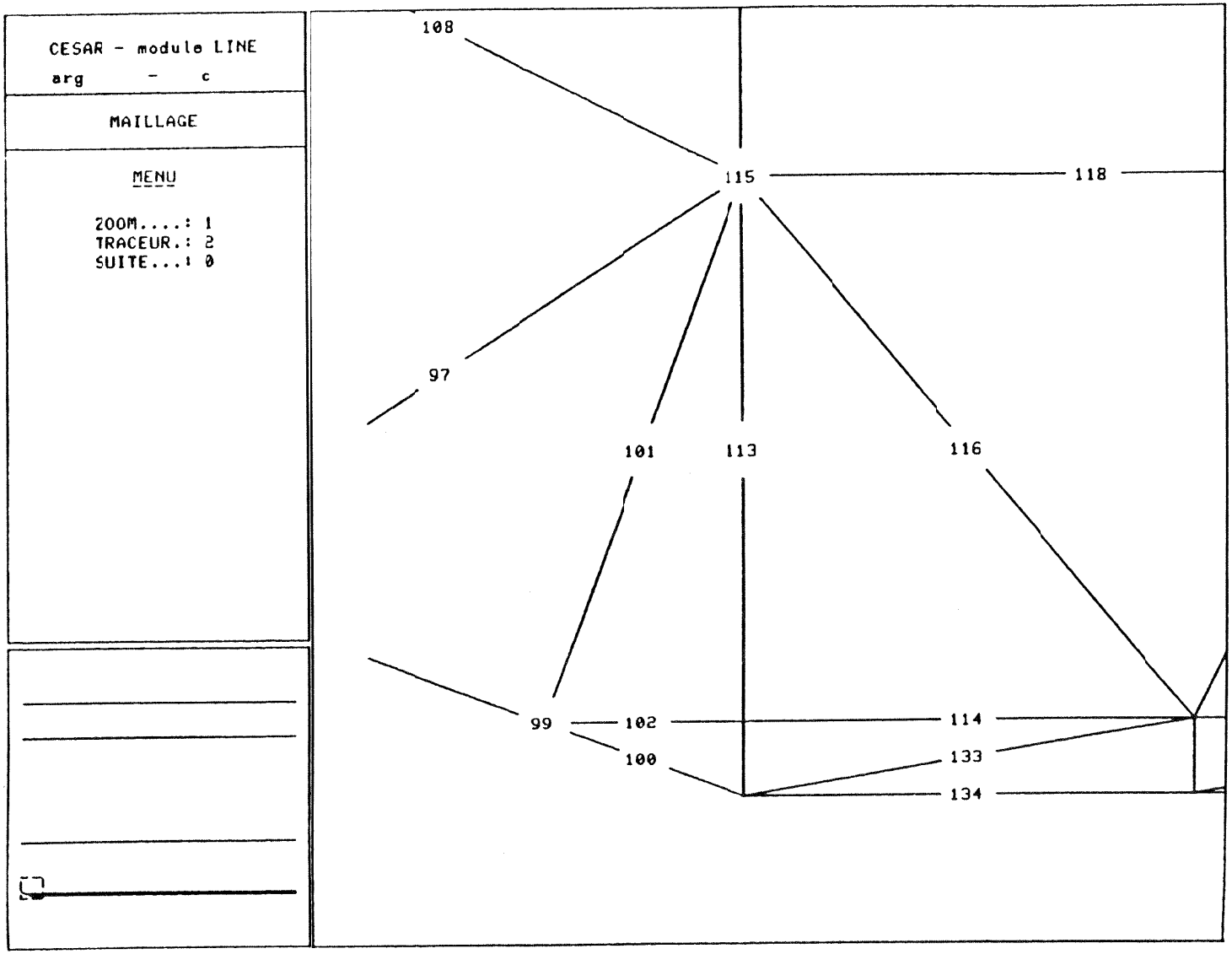
— MALHA DE ELEMENTOS FINITOS —

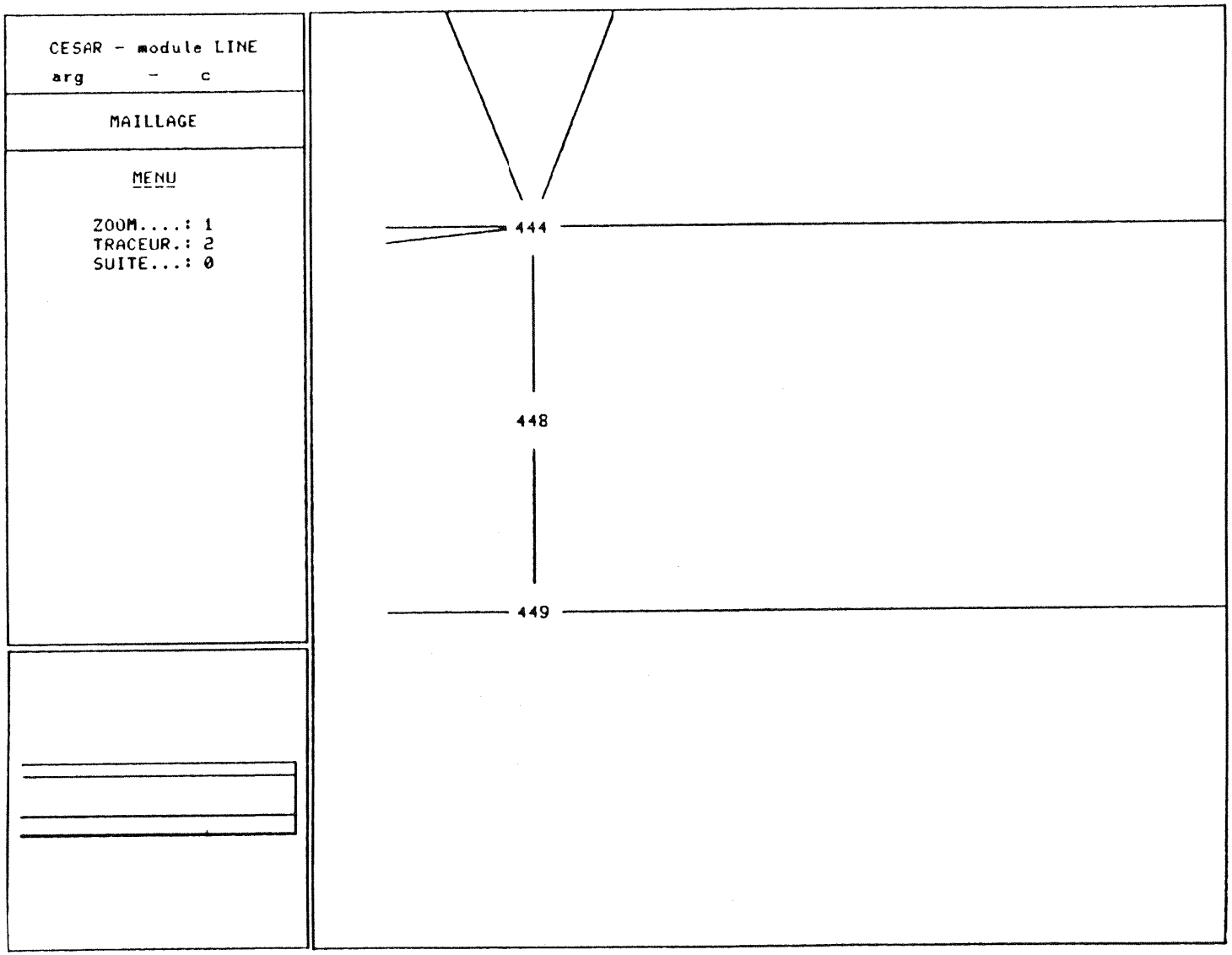

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0

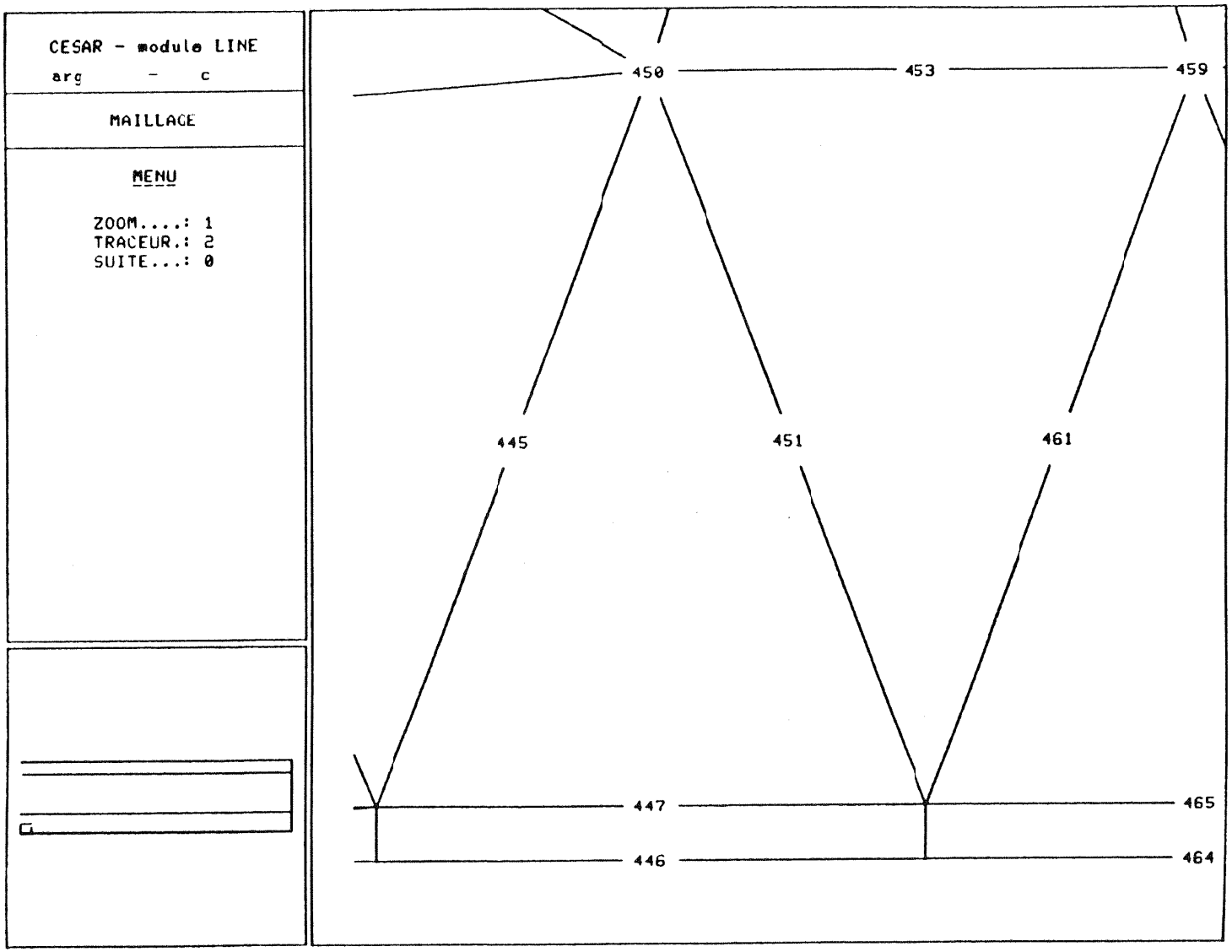

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0

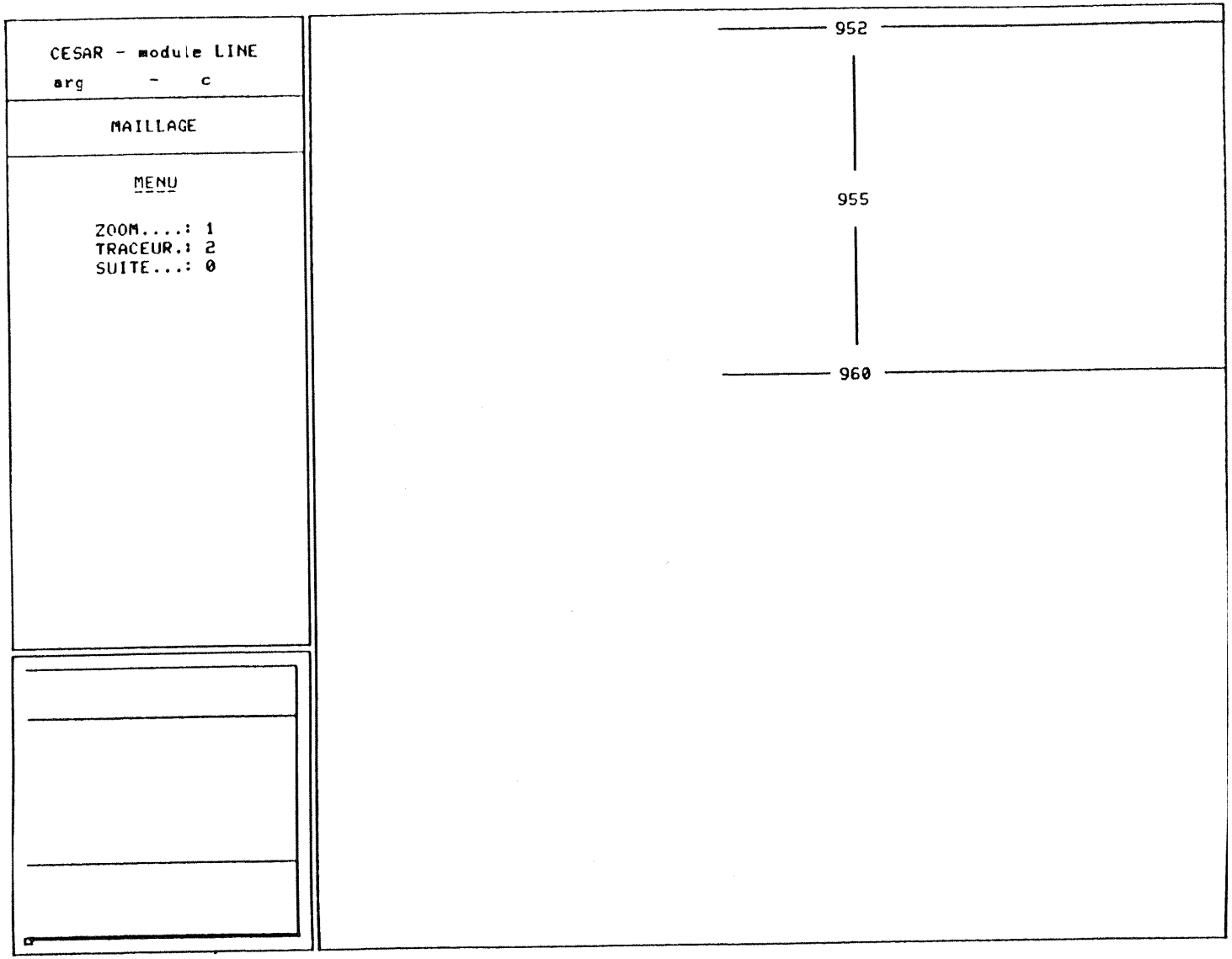

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
11 10 22 21 33 32 46 39 55
8 19 30 40 53
7 9 18 20 29 31 38 41 51
5 16 27 37 49
4 6 15 17 26 28 34 36 47
3 14 25 35 44 48
1 2 12 13 23 24 42 45
43

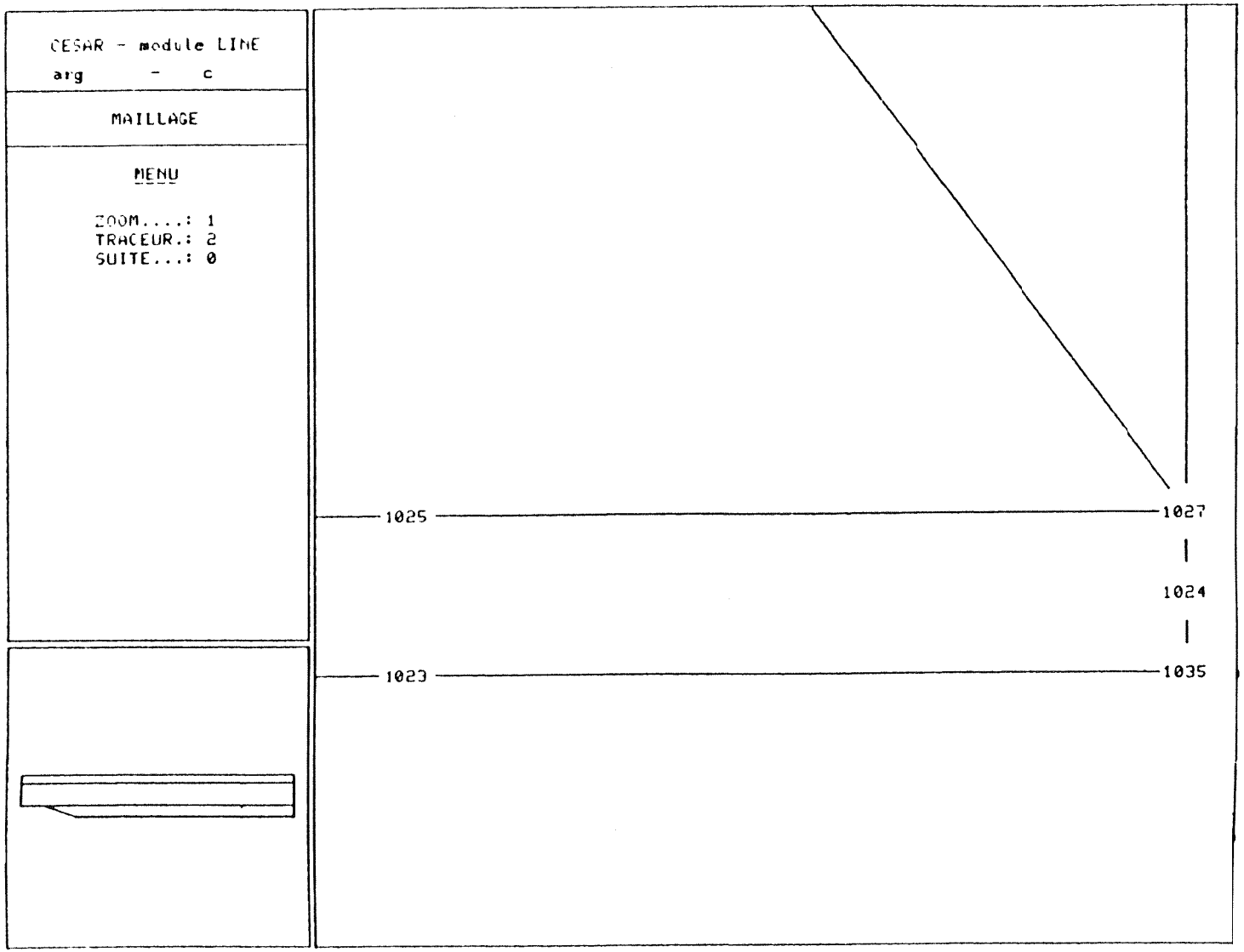

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
99
102
111
100
112
132

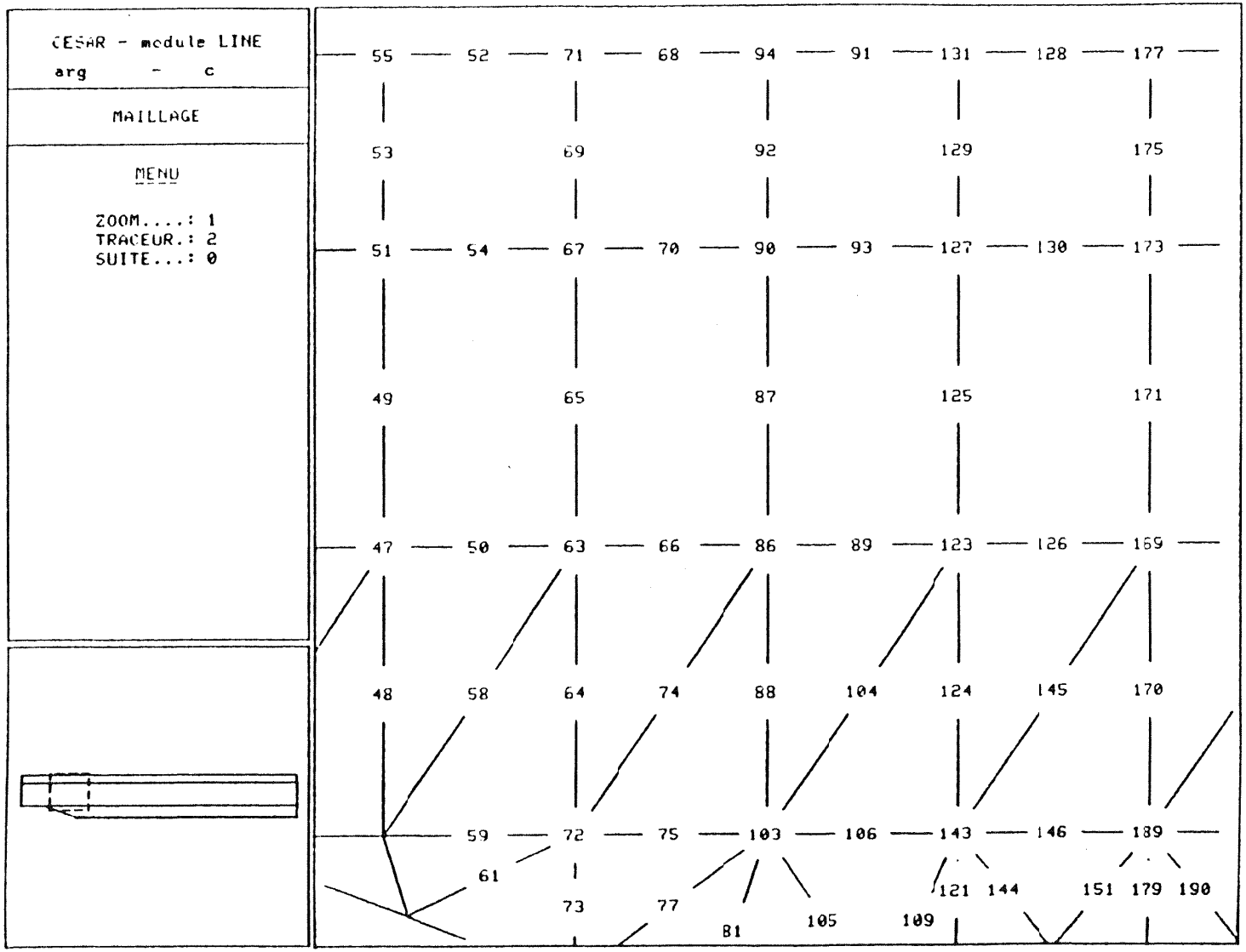

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
108
115
118
97
101
113
116
99
102
114
100
133
134

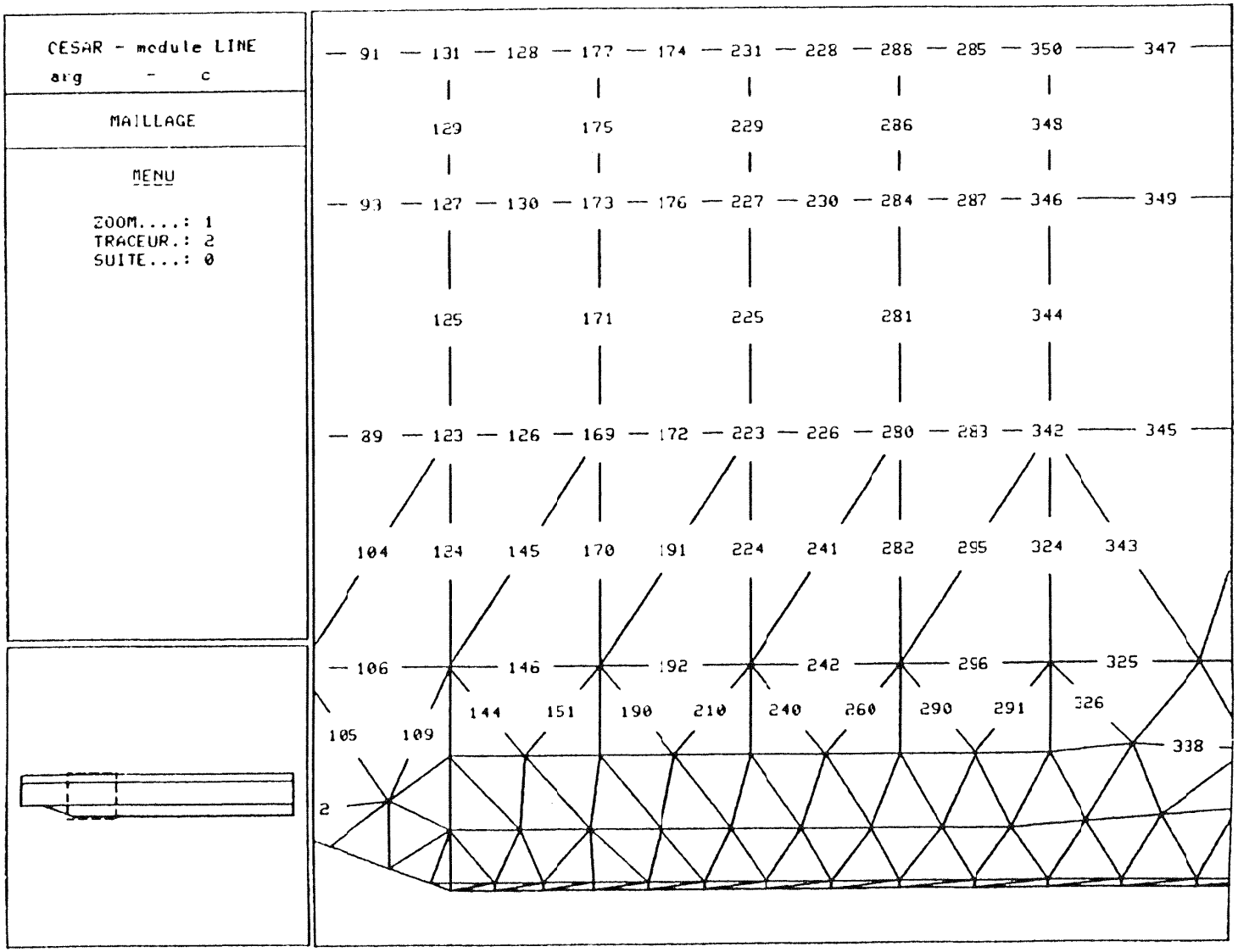

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
444
448
449


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
450
453
459
445
451
461
447
465
446
464


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
952
955
960


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
1025
1027
1024
1023
1035


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
55 52 71 68 94 91 131 128 177
53 69 92 129 175
51 54 67 70 90 93 127 130 173
49 65 87 125 171
47 50 63 66 86 89 123 126 169
48 58 64 74 88 104 124 145 170
59 72 75 103 106 143 146 189
61 73 77 81 105 109 121 144 151 179 190


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
91 131 128 177 174 231 228 288 285 350 347
129 175 229 286 348
93 127 130 173 176 227 230 284 287 346 349
125 171 225 281 344
89 123 126 169 172 223 226 280 283 342 345
104 124 145 170 191 224 241 282 295 324 343
106 146 192 242 296 325
144 151 190 210 240 260 290 291 326
105 109
338
2

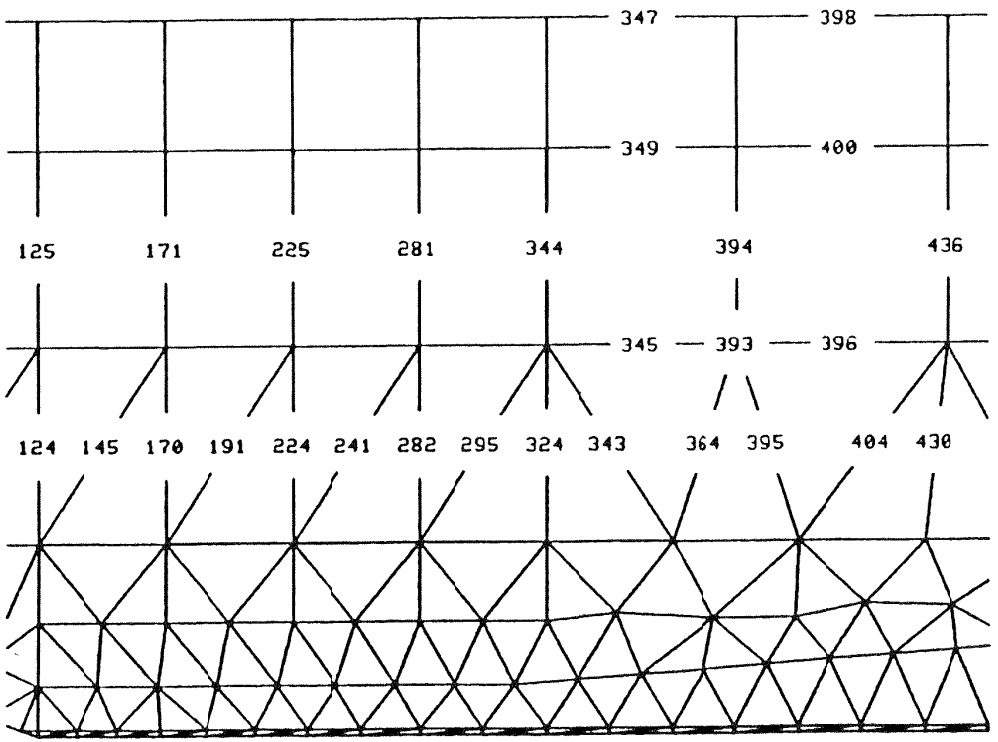
CESAR - module LINE

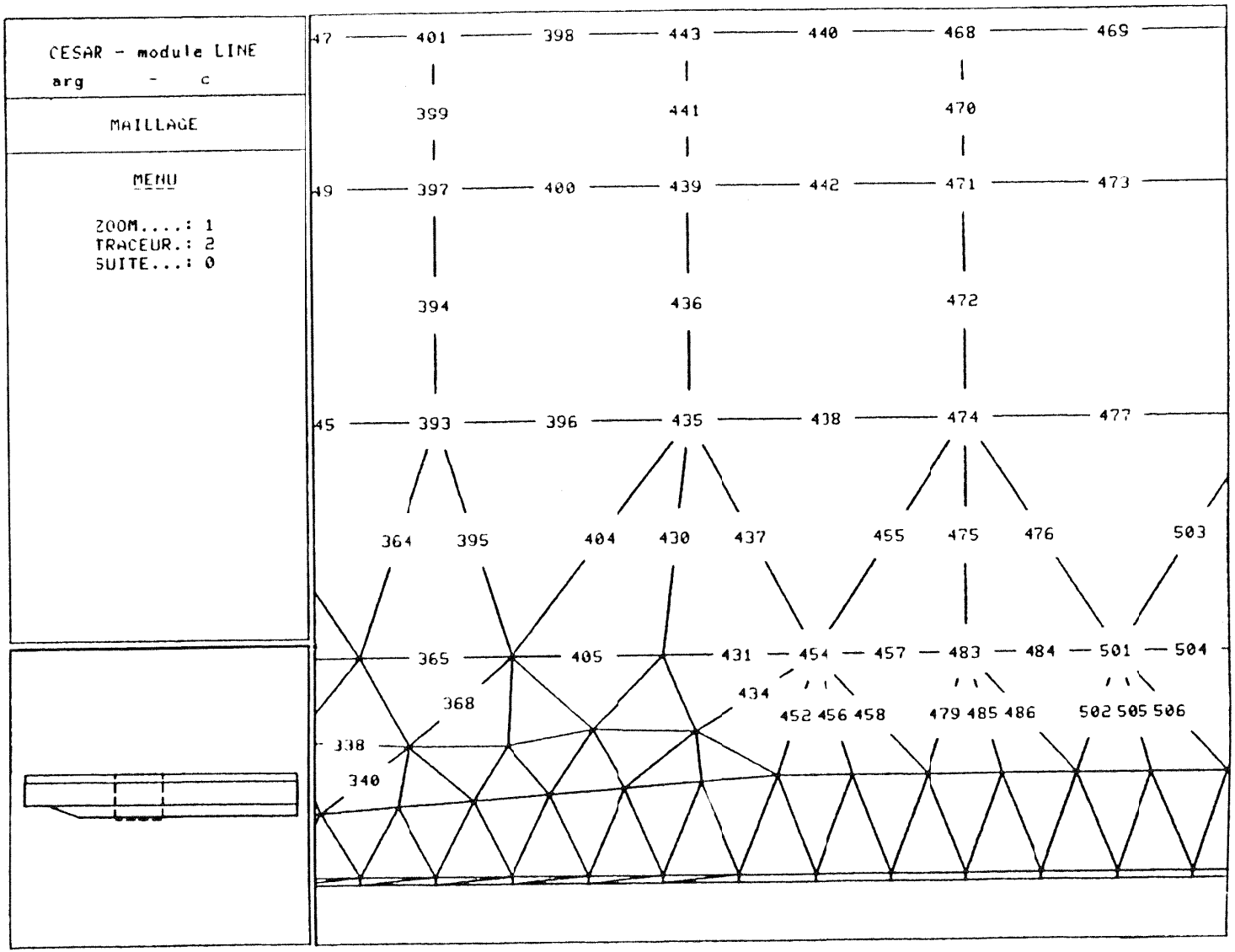
arg - c

MAILLAGE

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0




CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
47
401
398
443
440
468
469
399
441
470
49
397
400
439
442
471
473
394
436
472
45
393
396
435
438
474
477
364
395
404
430
437
455
475
476
503
365
405
431
454
457
483
484
501
504
434
368
452 456 458
479 485 486
502 505 506
338
340

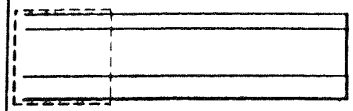
CESAR - module LINE

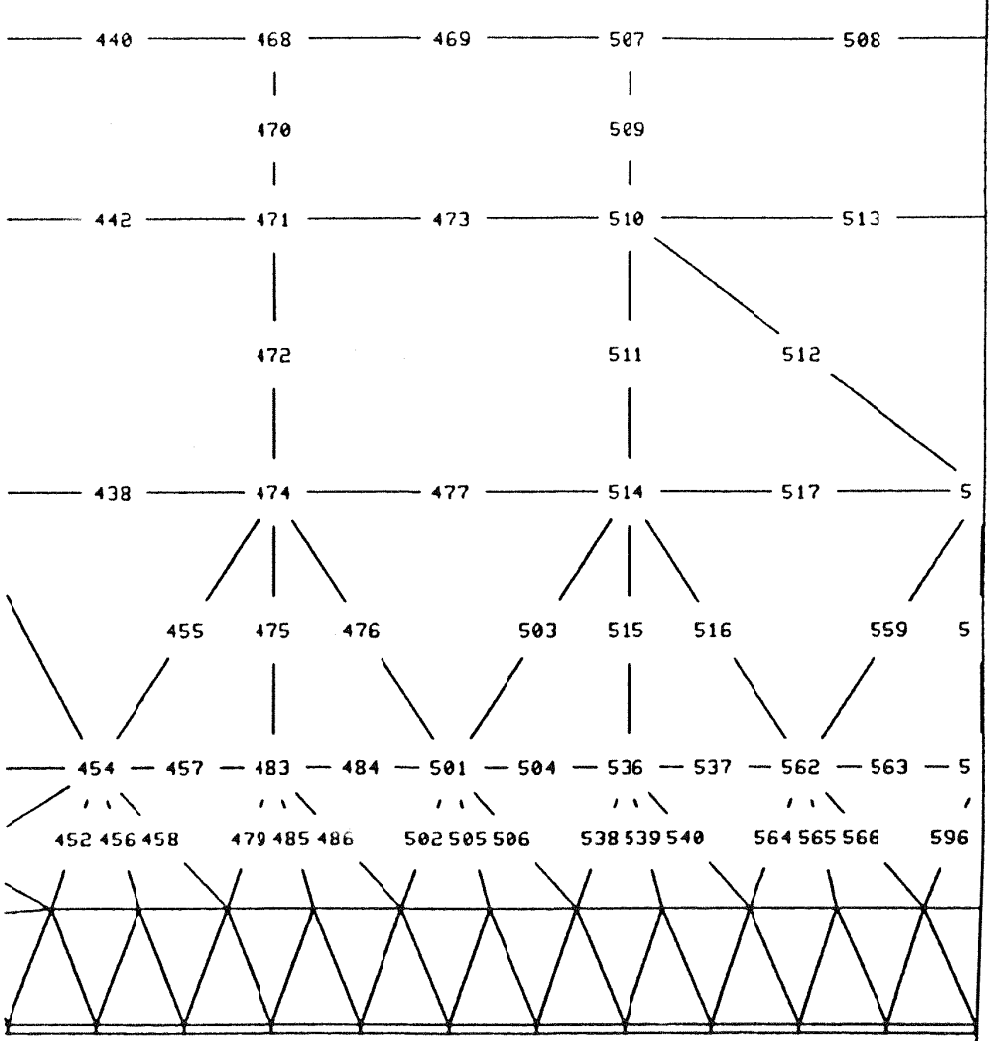
arg - c

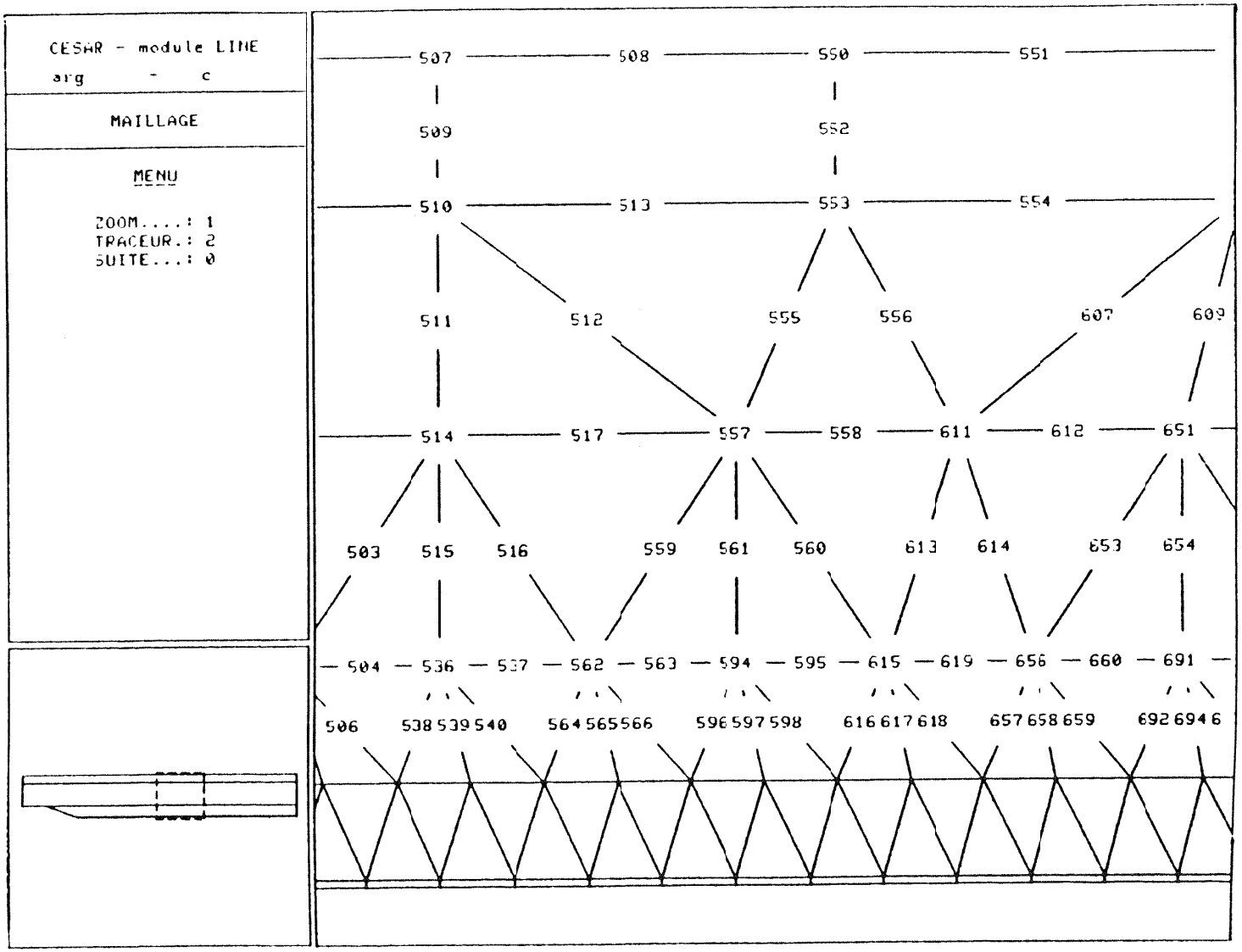
MAILLAGE

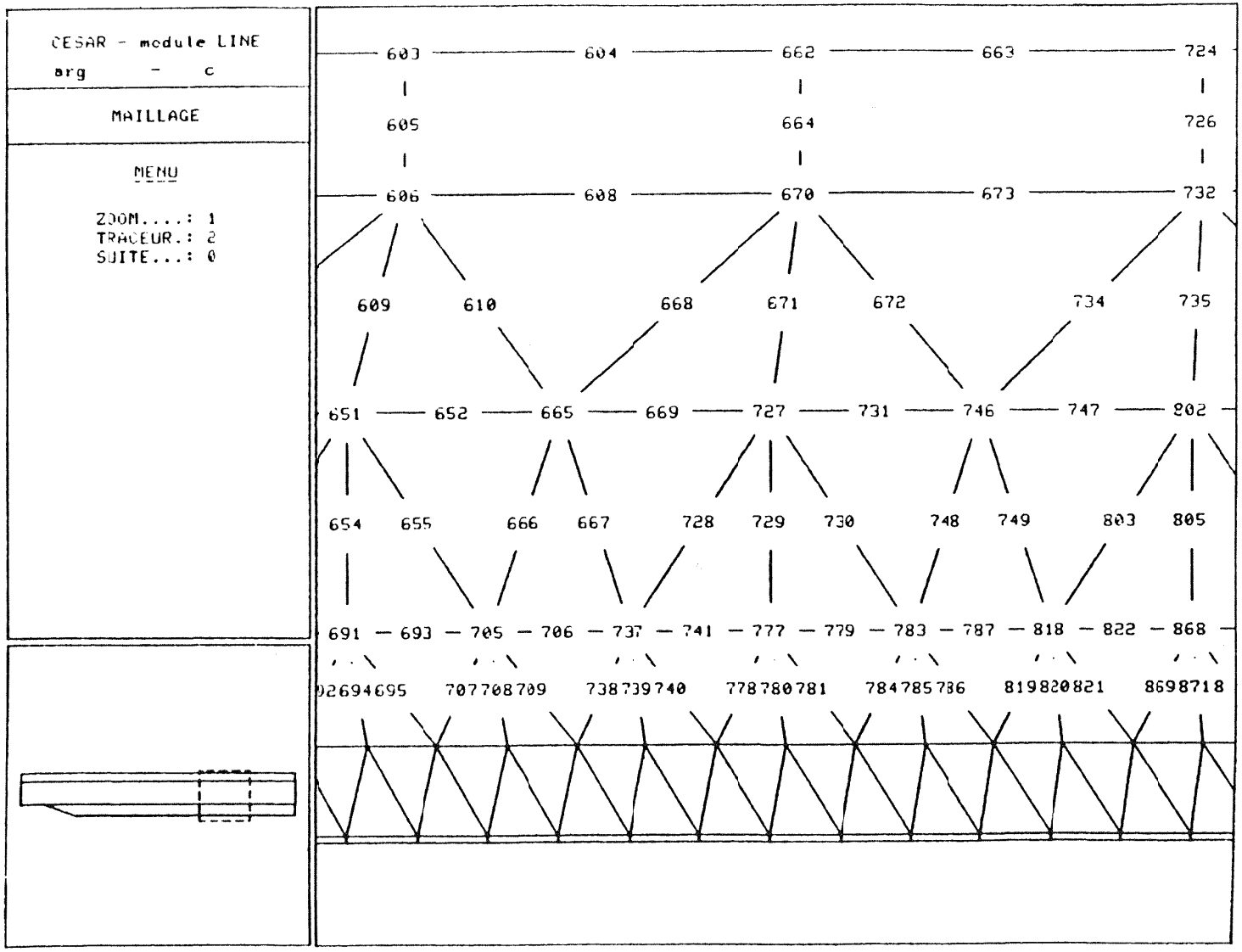
MENU

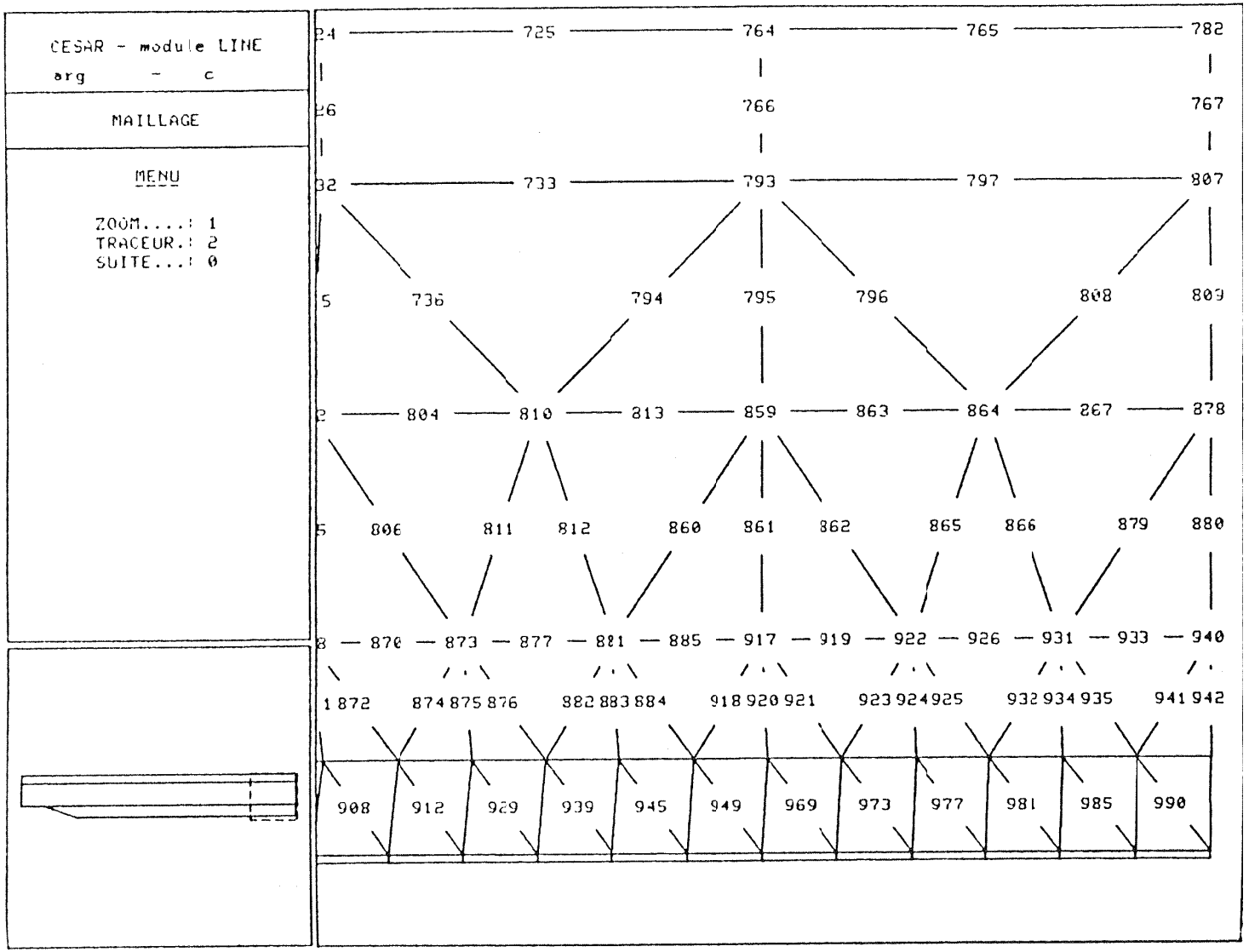
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0





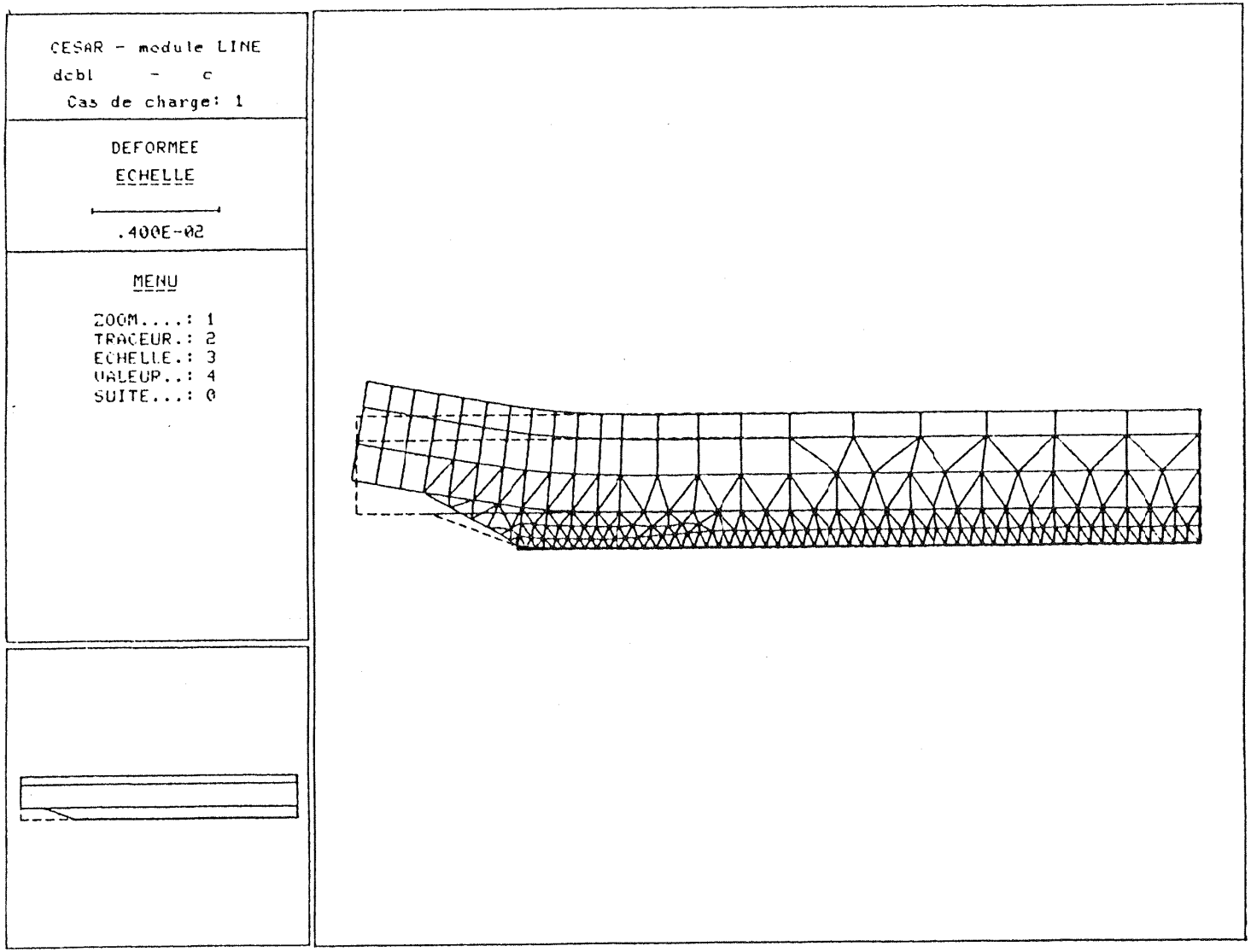

CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
507
508
550
551
509
552
510
513
553
554
511
512
555
556
607
609
514
517
557
558
611
612
651
503
515
516
559
561
560
613
614
653
654
504
536
537
562
563
594
595
615
619
656
660
691
506
538 539 540
564 565 566
596 597 598
616 617 618
657 658 659
692 694 6


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
603 604 662 663 724
605 664 726
606 608 670 673 732
609 610 668 671 672 734 735
651 652 665 669 727 731 746 747 802
654 655 666 667 728 729 730 748 749 803 805
691 693 705 706 737 741 777 779 783 787 818 822 868
02694695 707708709 738739740 778780781 784785786 819820821 8698718


CESAR - module LINE
arg - c
MAILLAGE
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
24 725 764 765 782
26 766 767
32 733 793 797 807
5 736 794 795 796 808 809
2 804 810 813 859 863 864 867 878
5 806 811 812 860 861 862 865 866 879 880
8 870 873 877 881 885 917 919 922 926 931 933 940
1 872 874 875 876 882 883 884 918 920 921 923 924 925 932 934 935 941 942
908 912 929 939 945 949 969 973 977 981 985 990

— ANEXO 3.2 —

— ARGAMASSA + COLA $a = 3,0\,cm$ —


CESAR - module LINE
dcbl - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.400E-02
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

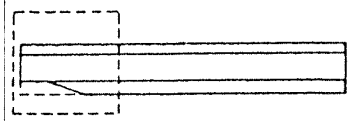
DEFORMEE
ECHELLE

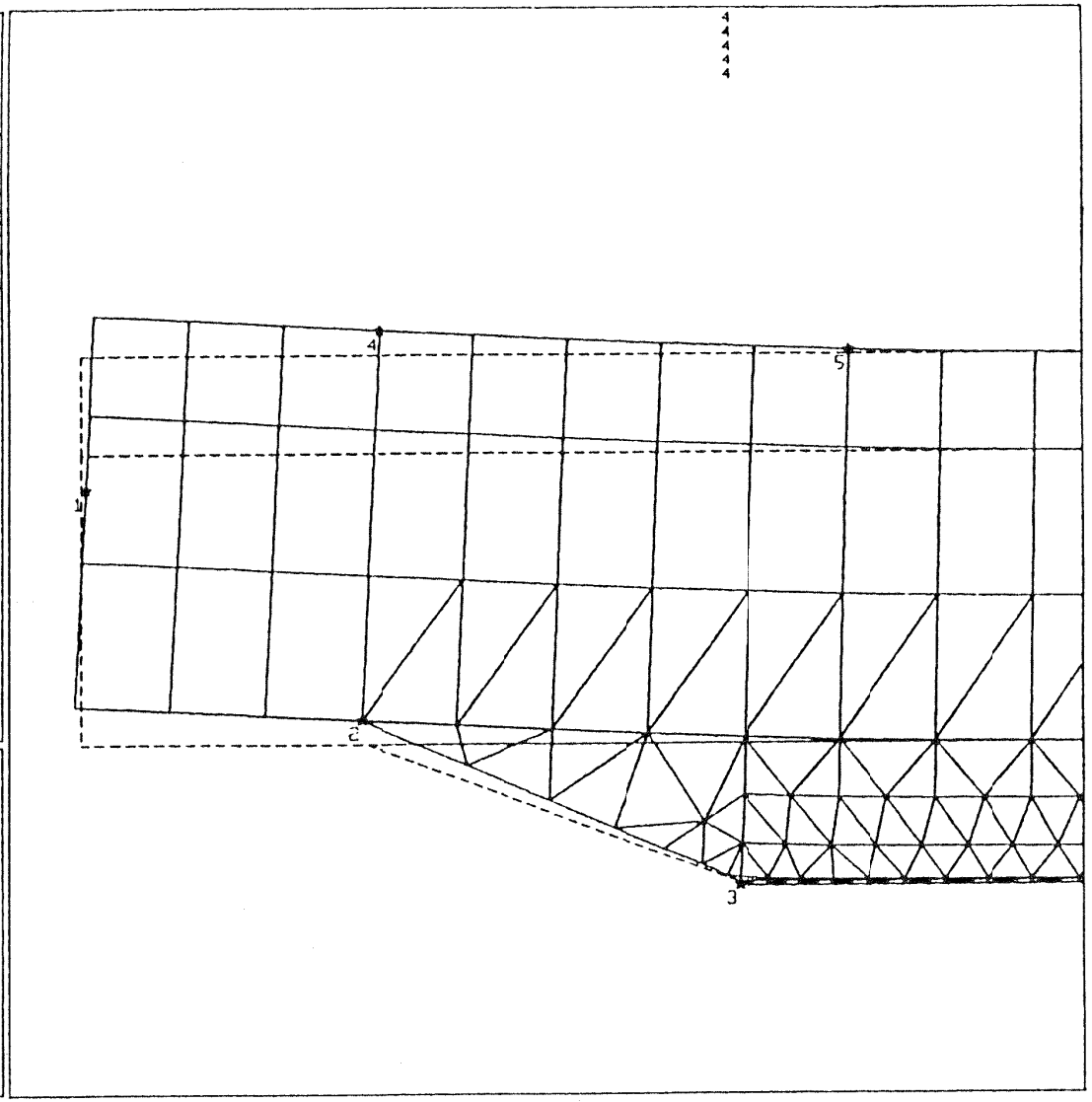
.400E-02

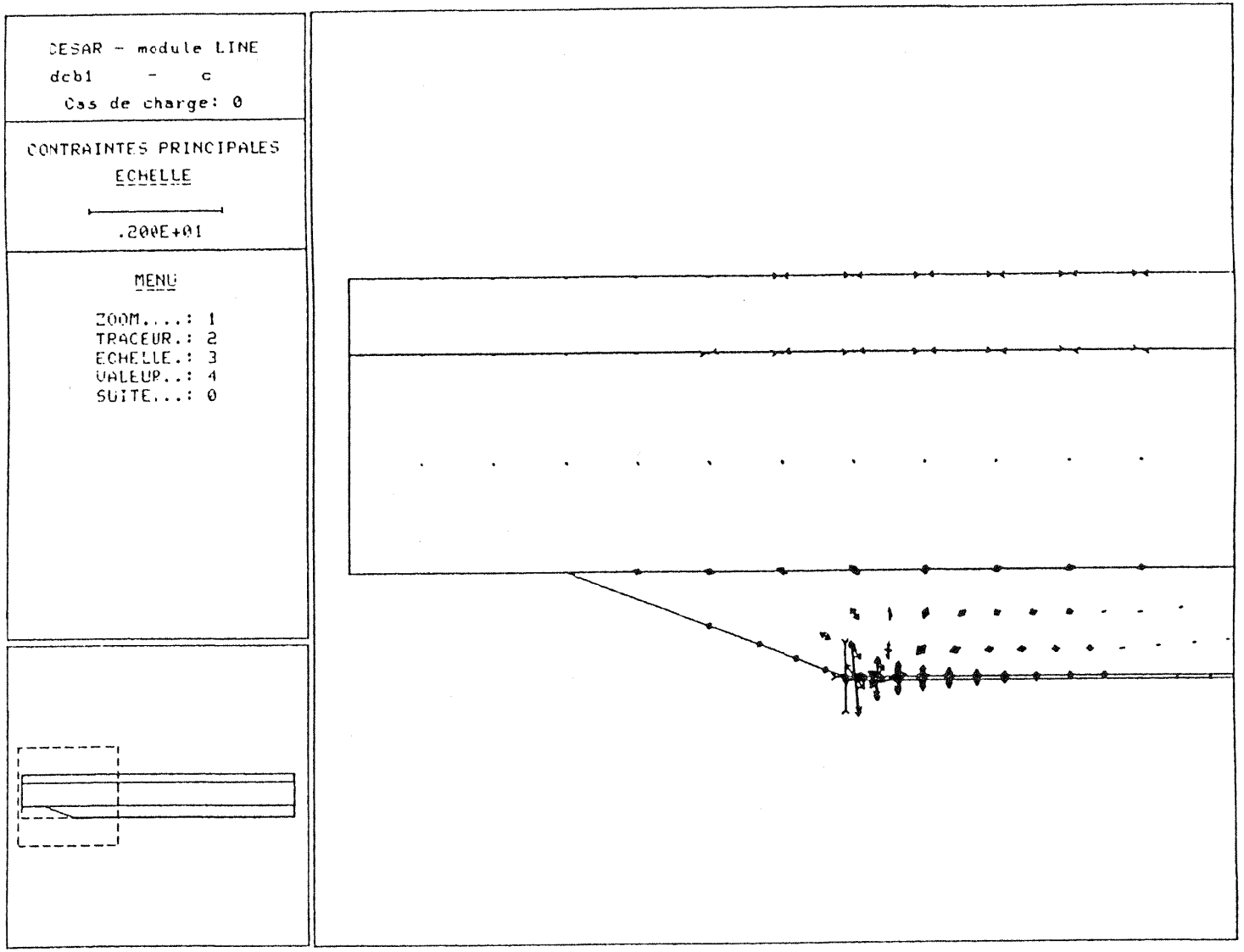
MENU

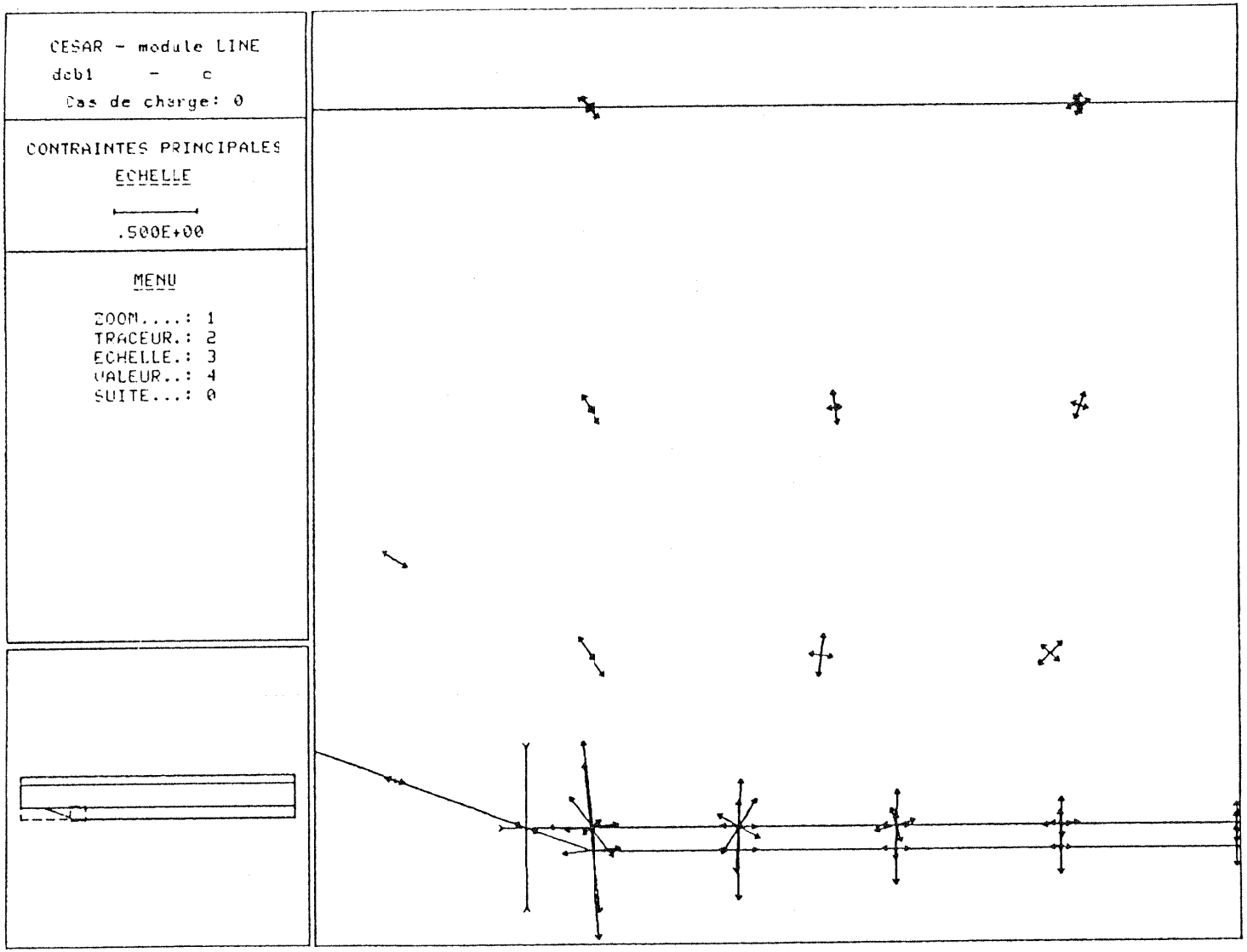
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

U	V
.1092E-03	.1000E-02
-.1608E-03	.6164E-03
-.2317E-03	.0000E+00
.3118E-03	.6347E-03
.1721E-03	.1152E-03






CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.200E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
deb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.500E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

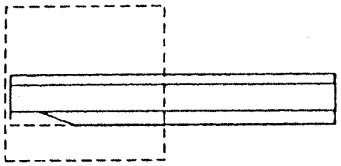
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

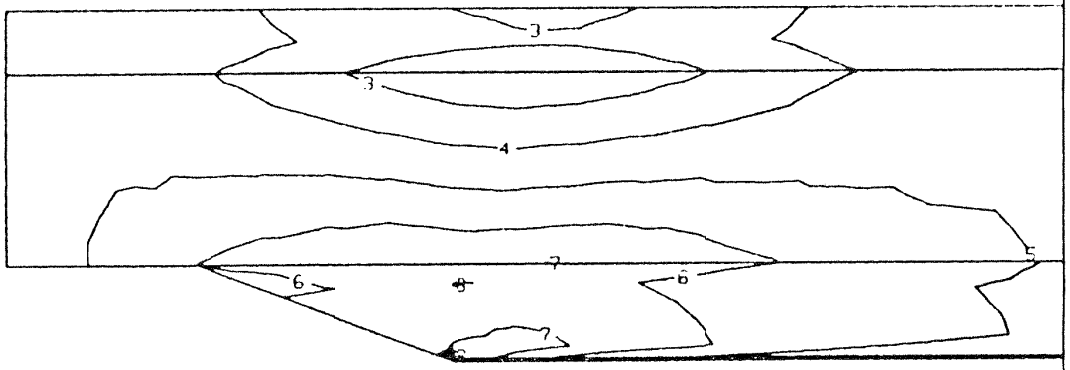
CONTRAINTE SX

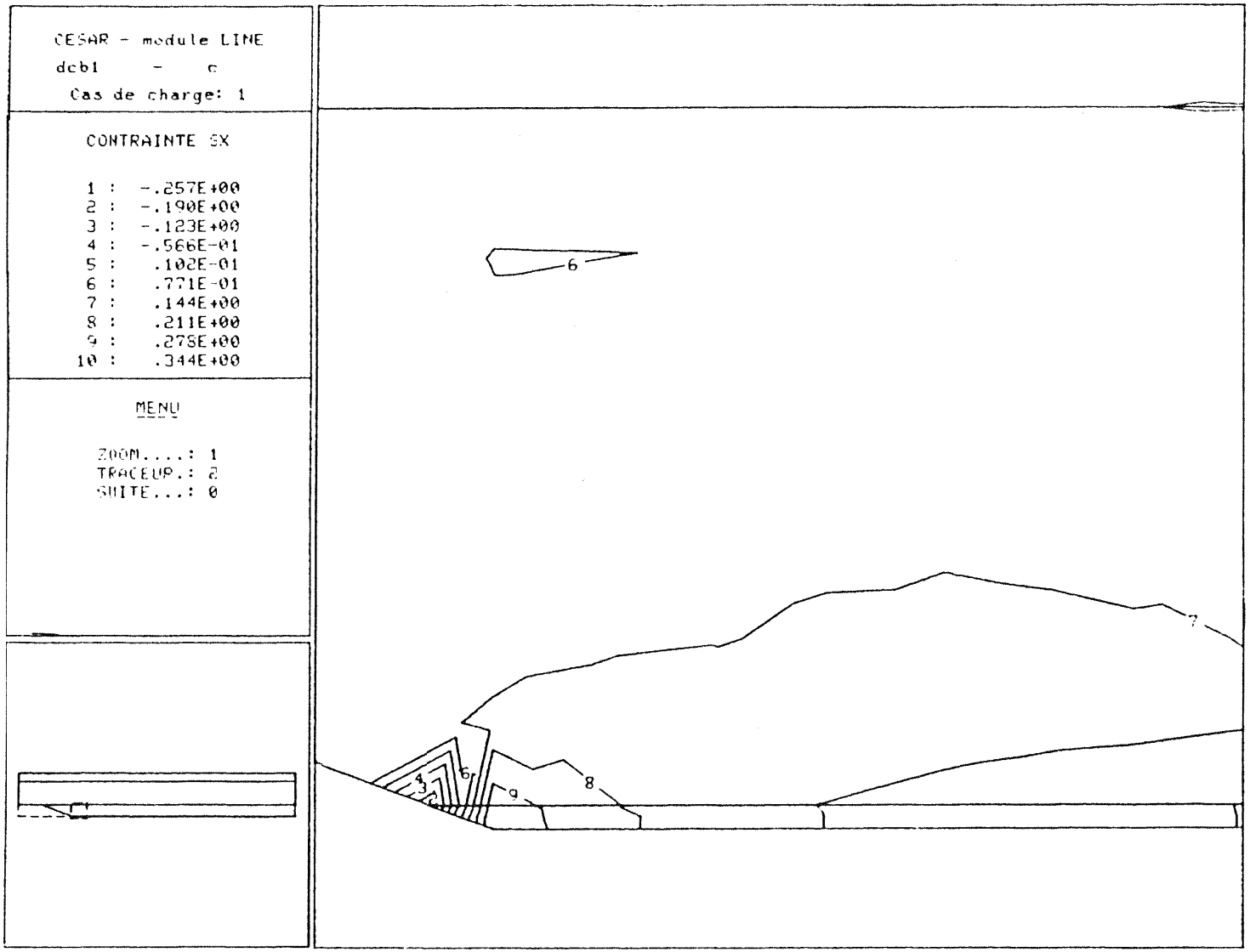
1 :	-.257E+00
2 :	-.190E+00
3 :	-.123E+00
4 :	-.566E-01
5 :	.102E-01
6 :	.771E-01
7 :	.144E+00
8 :	.211E+00
9 :	.278E+00
10 :	.344E+00

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0






CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.257E+00
2 : -.190E+00
3 : -.123E+00
4 : -.566E-01
5 : .102E-01
6 : .771E-01
7 : .144E+00
8 : .211E+00
9 : .278E+00
10 : .344E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUP.: 2
SUITE...: 0
6
7
8
9

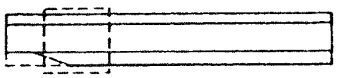
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

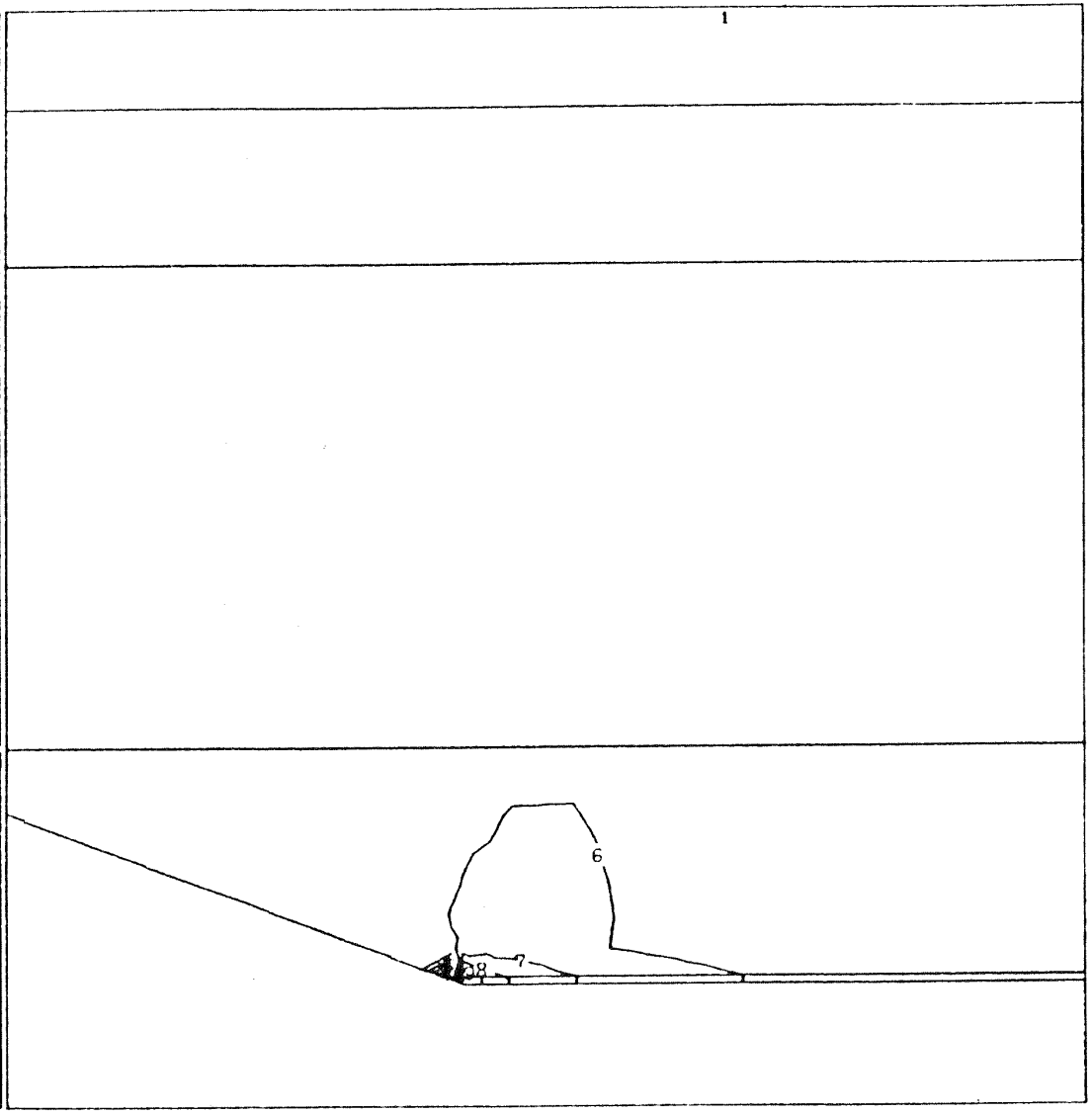
CONTRAINTE SY

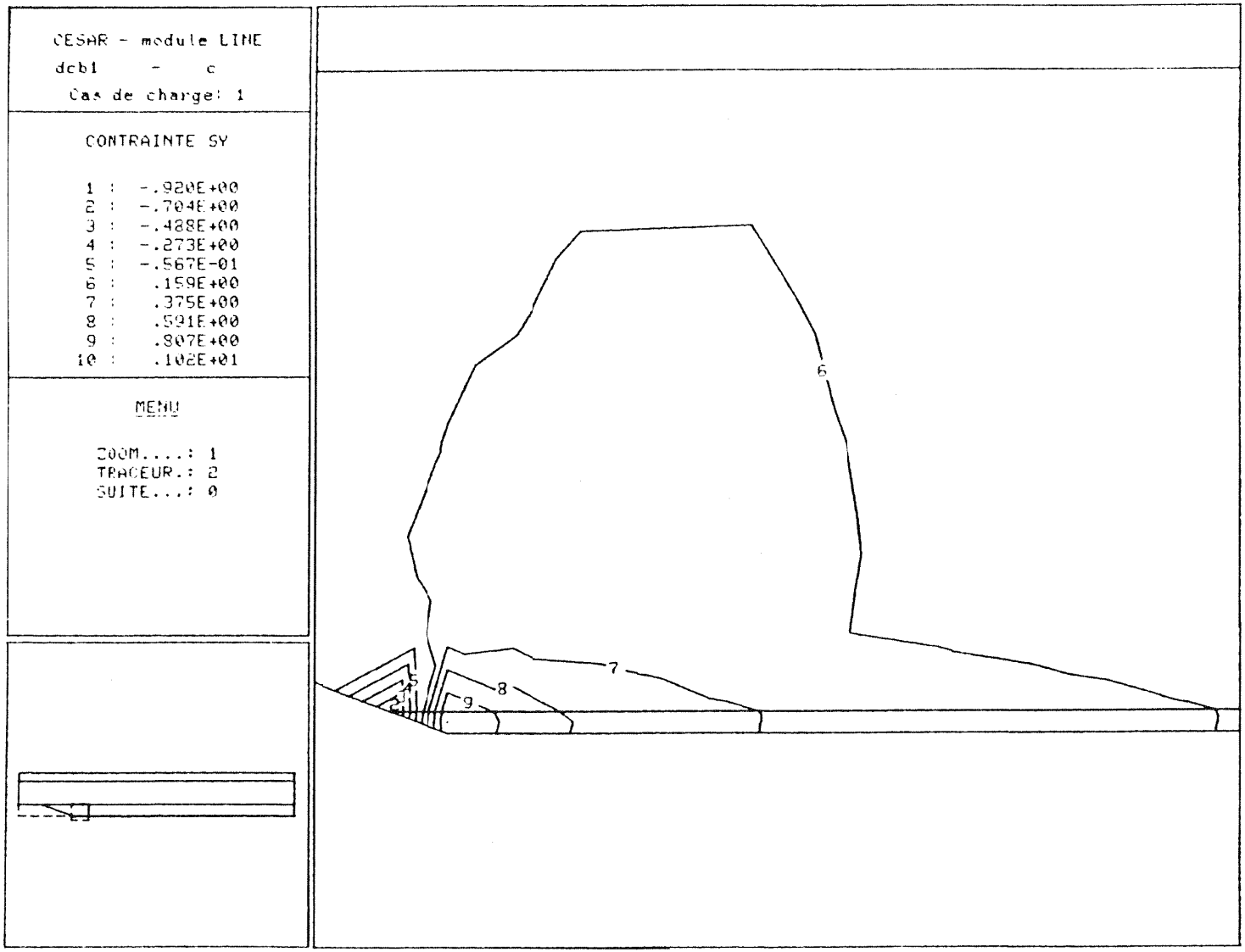
1 : -.920E+00
2 : -.704E+00
3 : -.438E+00
4 : -.273E+00
5 : -.567E-01
6 : .159E+00
7 : .375E+00
8 : .591E+00
9 : .807E+00
10 : .102E+01

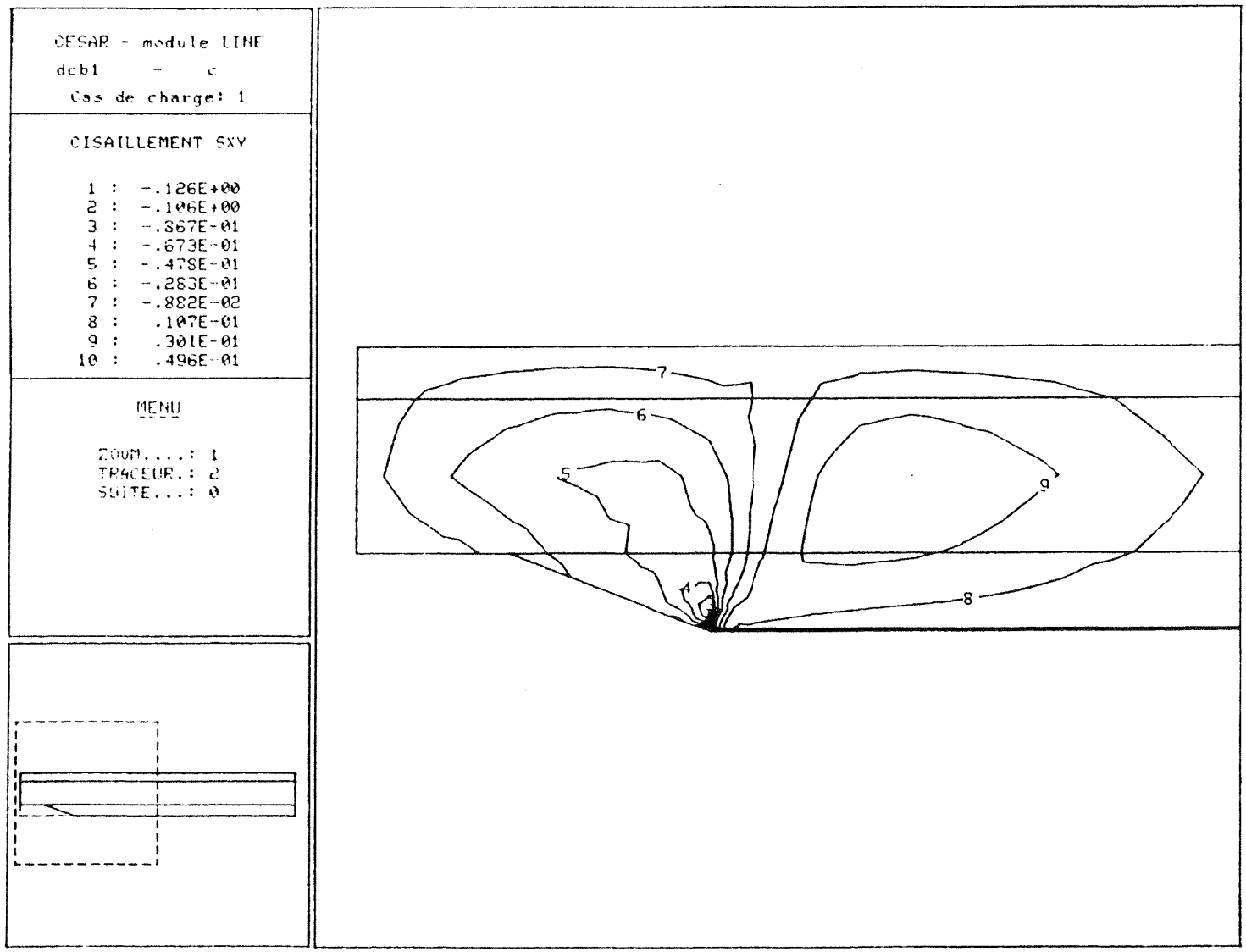
MENU

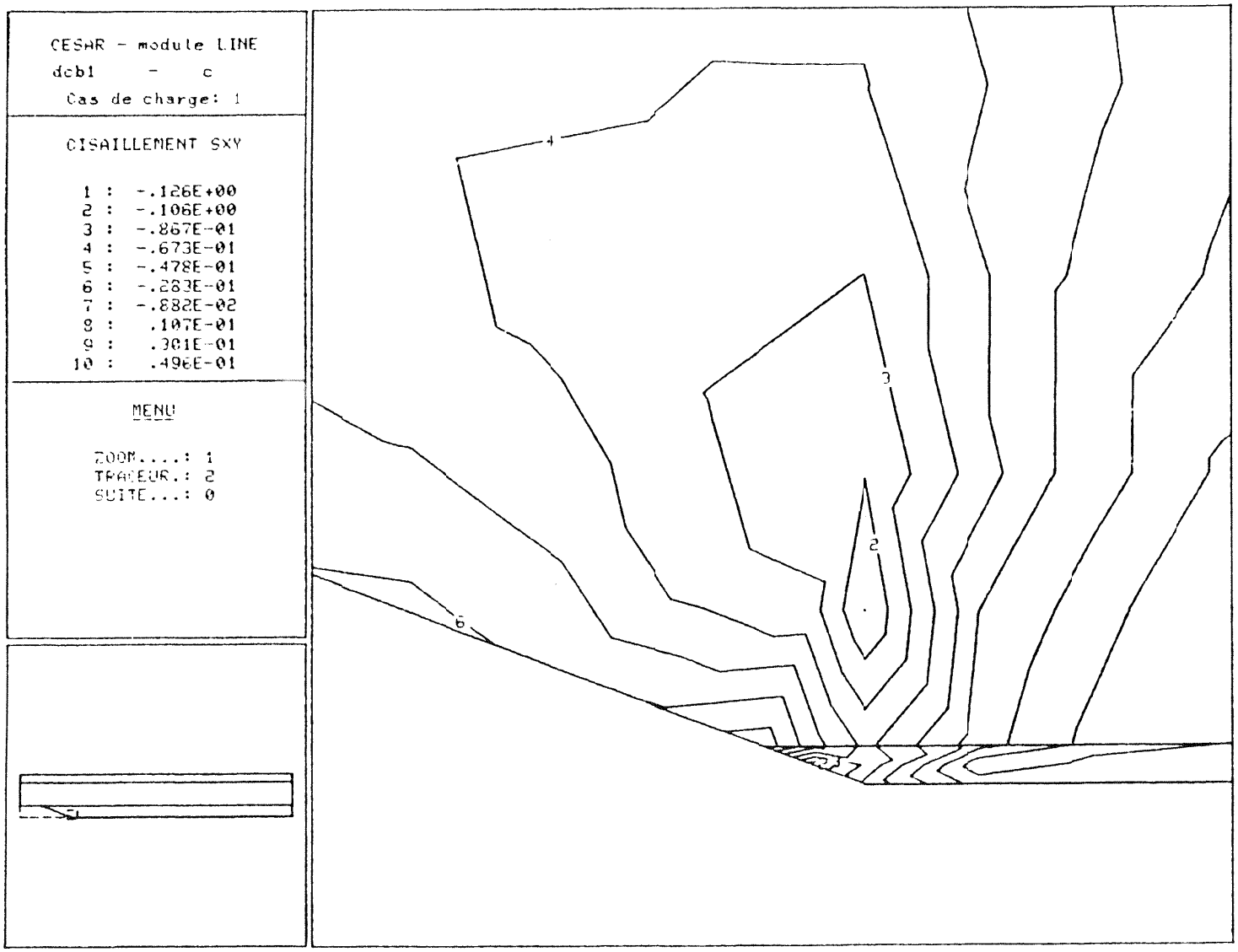
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0





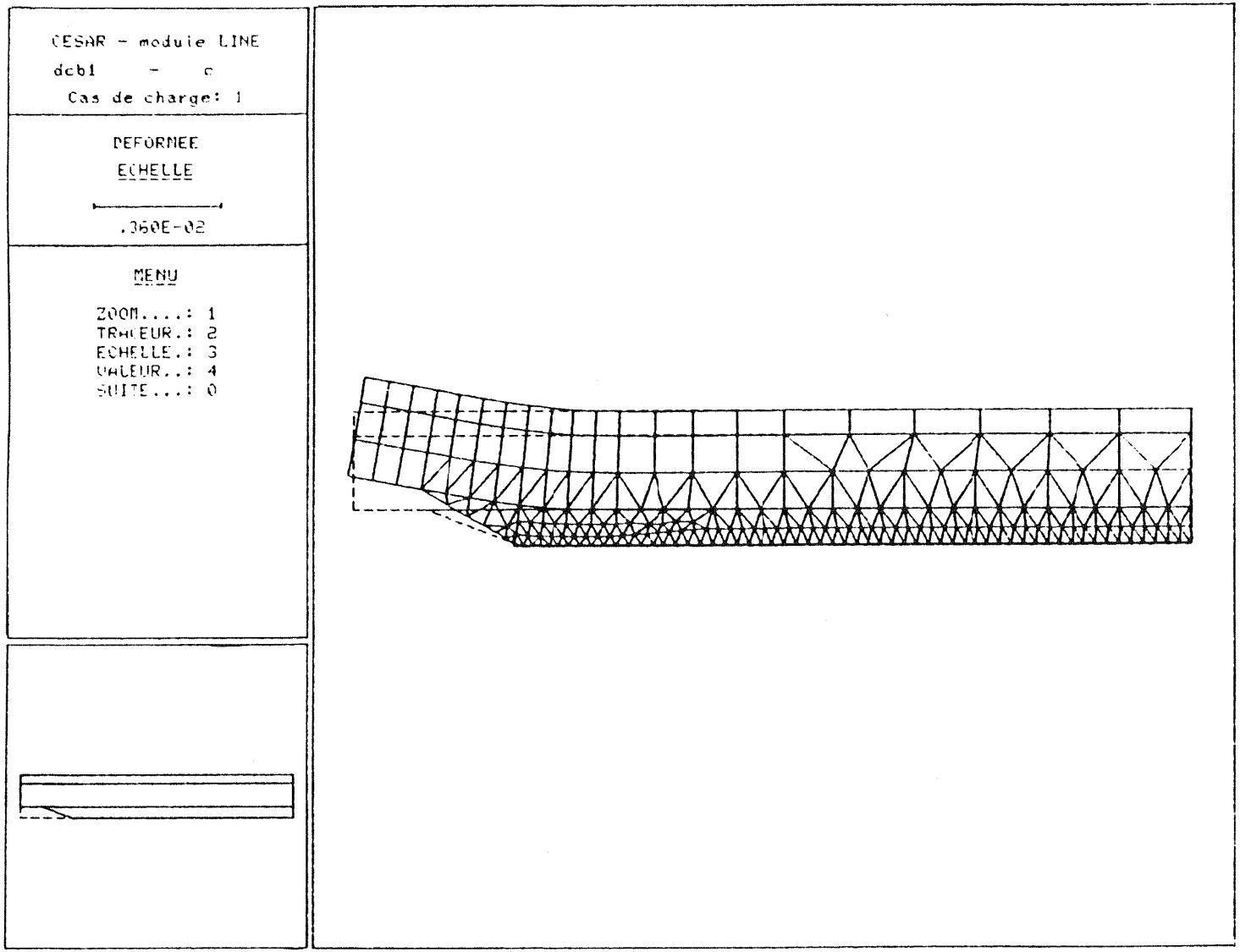

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.920E+00
2 : -.704E+00
3 : -.488E+00
4 : -.273E+00
5 : -.567E-01
6 : .159E+00
7 : .375E+00
8 : .591E+00
9 : .807E+00
10 : .102E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
6
7
8
9
5
4
3
2
1


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.126E+00
2 : -.106E+00
3 : -.867E-01
4 : -.673E-01
5 : -.478E-01
6 : -.283E-01
7 : -.882E-02
8 : .107E-01
9 : .301E-01
10 : .496E-01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
7
6
5
9
4
8


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.126E+00
2 : -.106E+00
3 : -.867E-01
4 : -.673E-01
5 : -.478E-01
6 : -.283E-01
7 : -.882E-02
8 : .107E-01
9 : .301E-01
10 : .496E-01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
1
2
3
4
5
6
7

— ANEXO 3.3 —

— ARGAMASSA $a = 3,0\,cm$ —


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.360E-02
MENU
ZOOM....: 1
TRHCEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

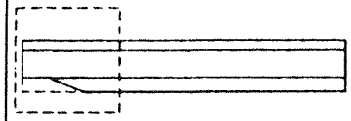
DEFORMEE
ECHELLE

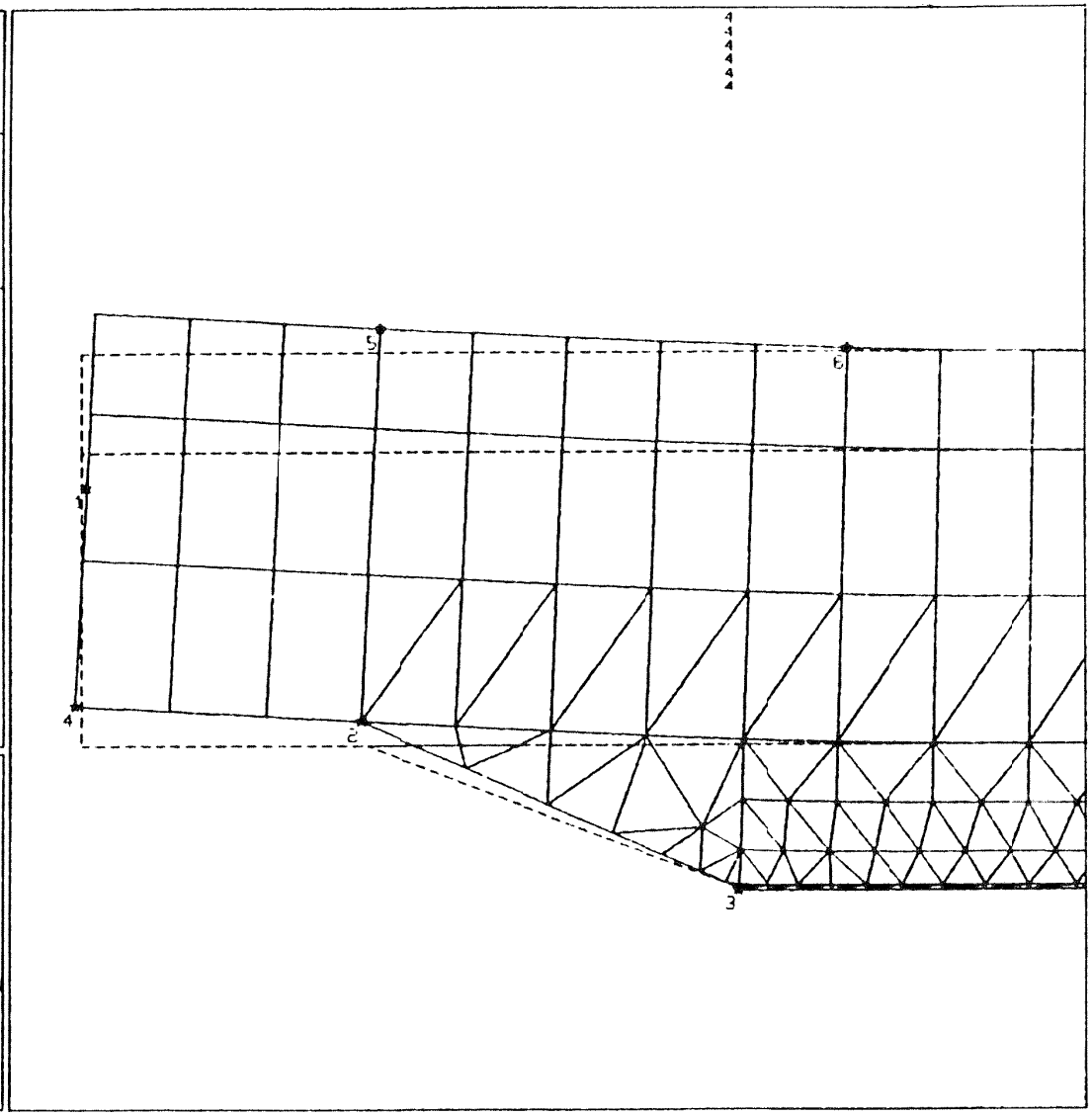
.360E-02

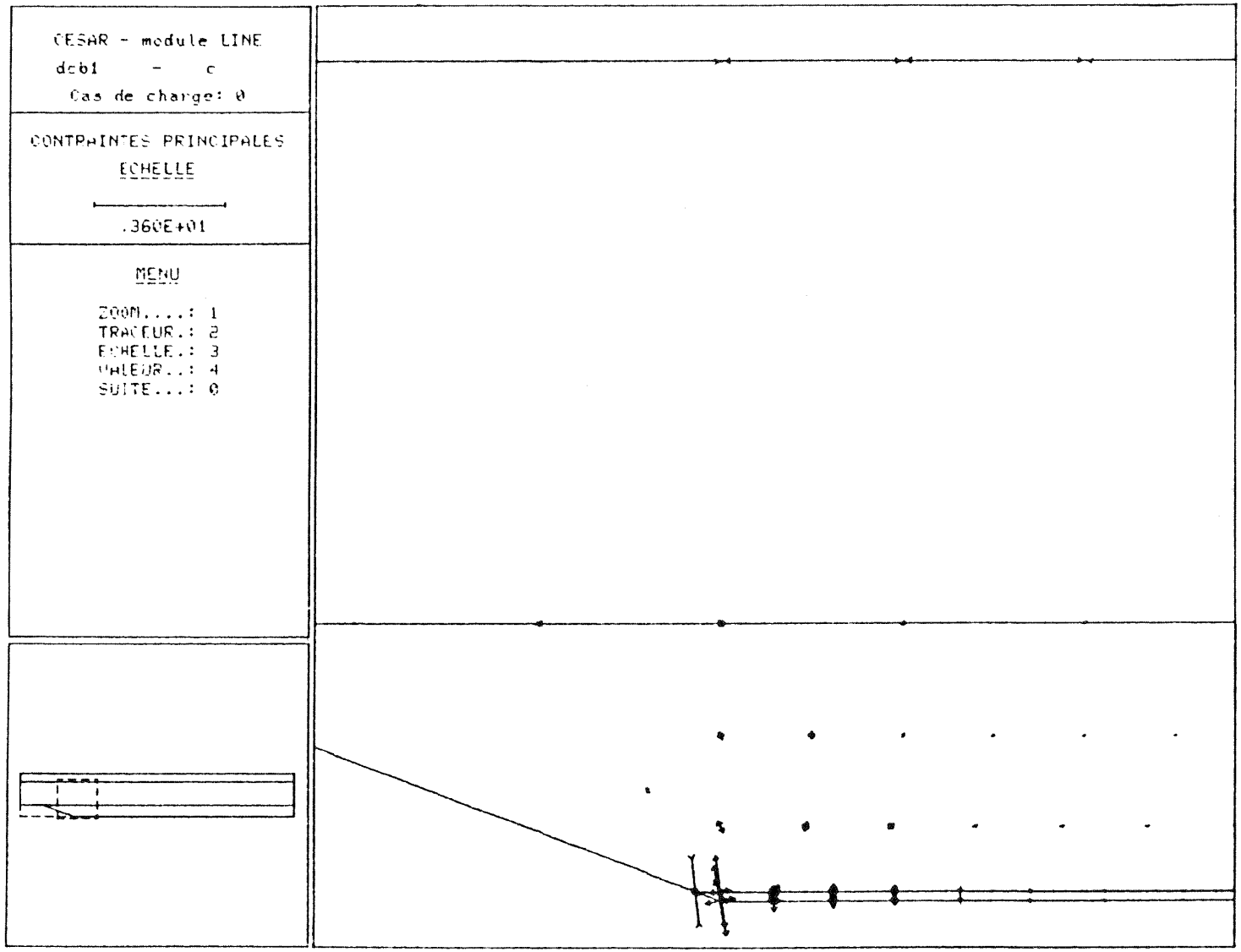
MENU

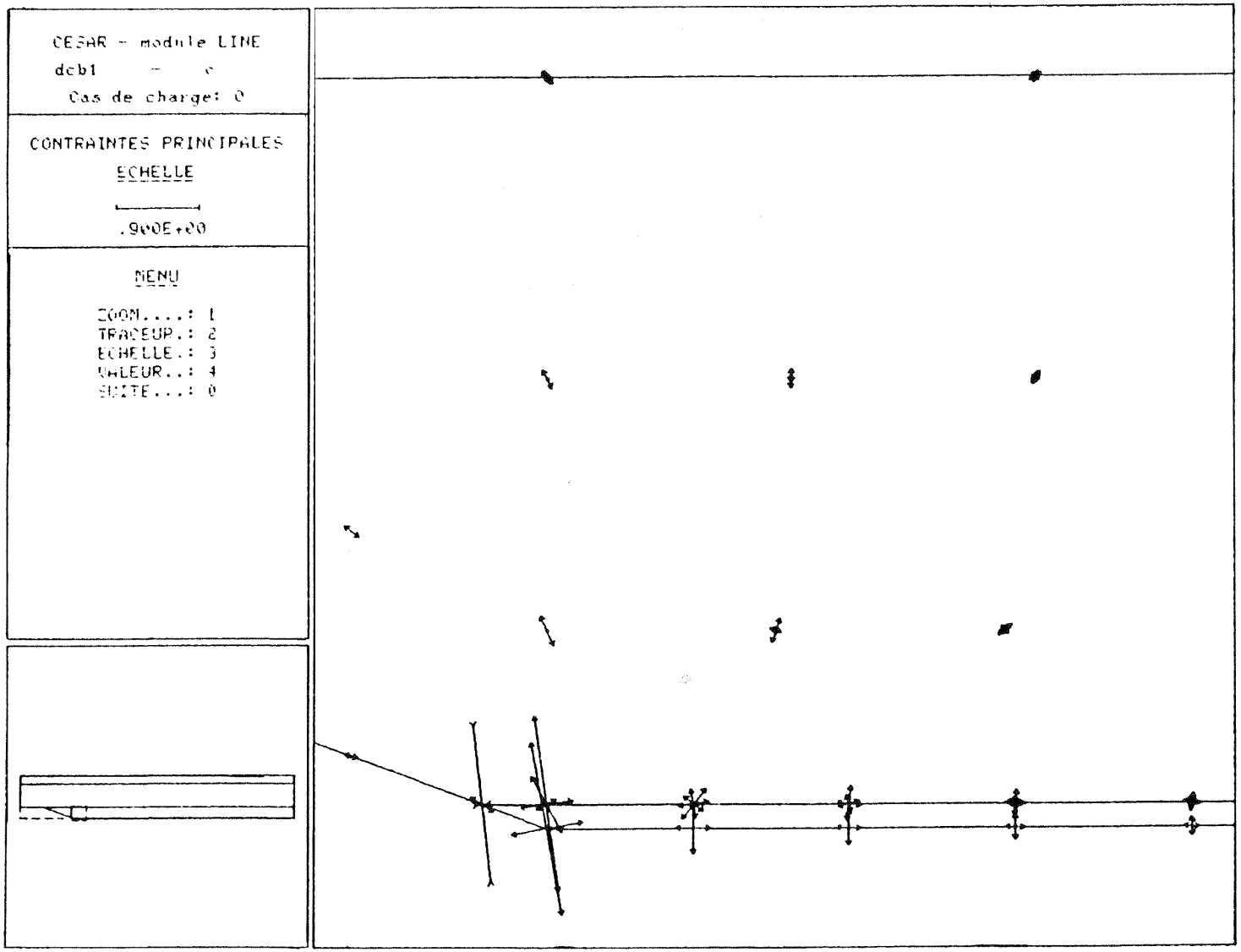
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

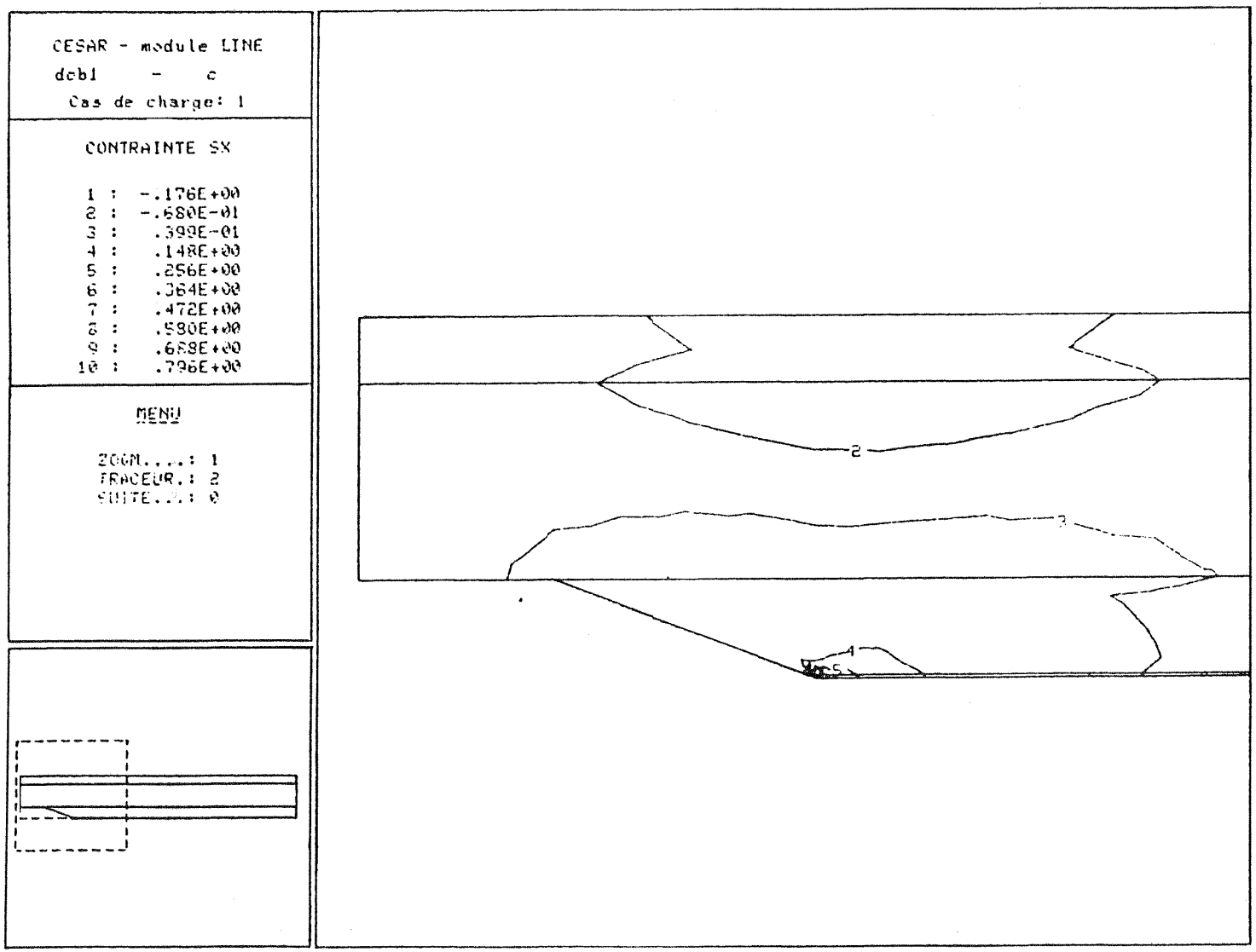
U	V
.1403E-03	.8903E-03
-.1466E-03	.9367E-03
-.3030E-03	.0000E+00
-.1548E-03	.8821E-03
.2359E-03	.5550E-03
.1482E-03	.5752E-04






CESAR - module LINE
deb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.360E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
deb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.900E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
debl - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.176E+00
2 : -.680E-01
3 : .399E-01
4 : .148E+00
5 : .256E+00
6 : .364E+00
7 : .472E+00
8 : .580E+00
9 : .688E+00
10 : .796E+00
MENU
ZOOM....: 1
FRACEUR.: 2
SUITE...: 0
1
2
3
5

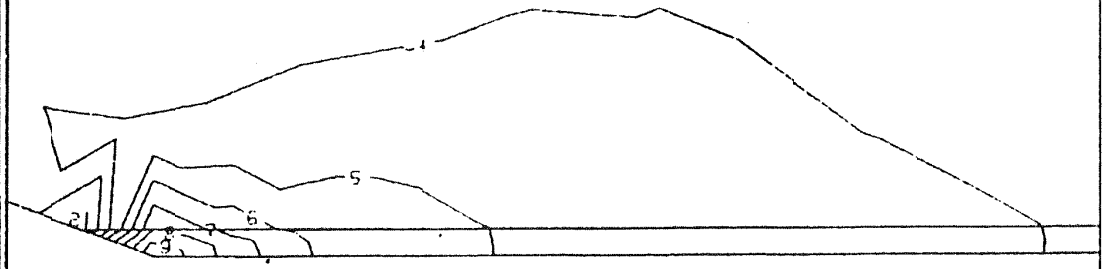
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

CONTRAINTE SX

1 :	-.176E+00
2 :	-.680E-01
3 :	.399E-01
4 :	.148E+00
5 :	.256E+00
6 :	.364E+00
7 :	.472E+00
8 :	.580E+00
9 :	.688E+00
10 :	.796E+00

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0



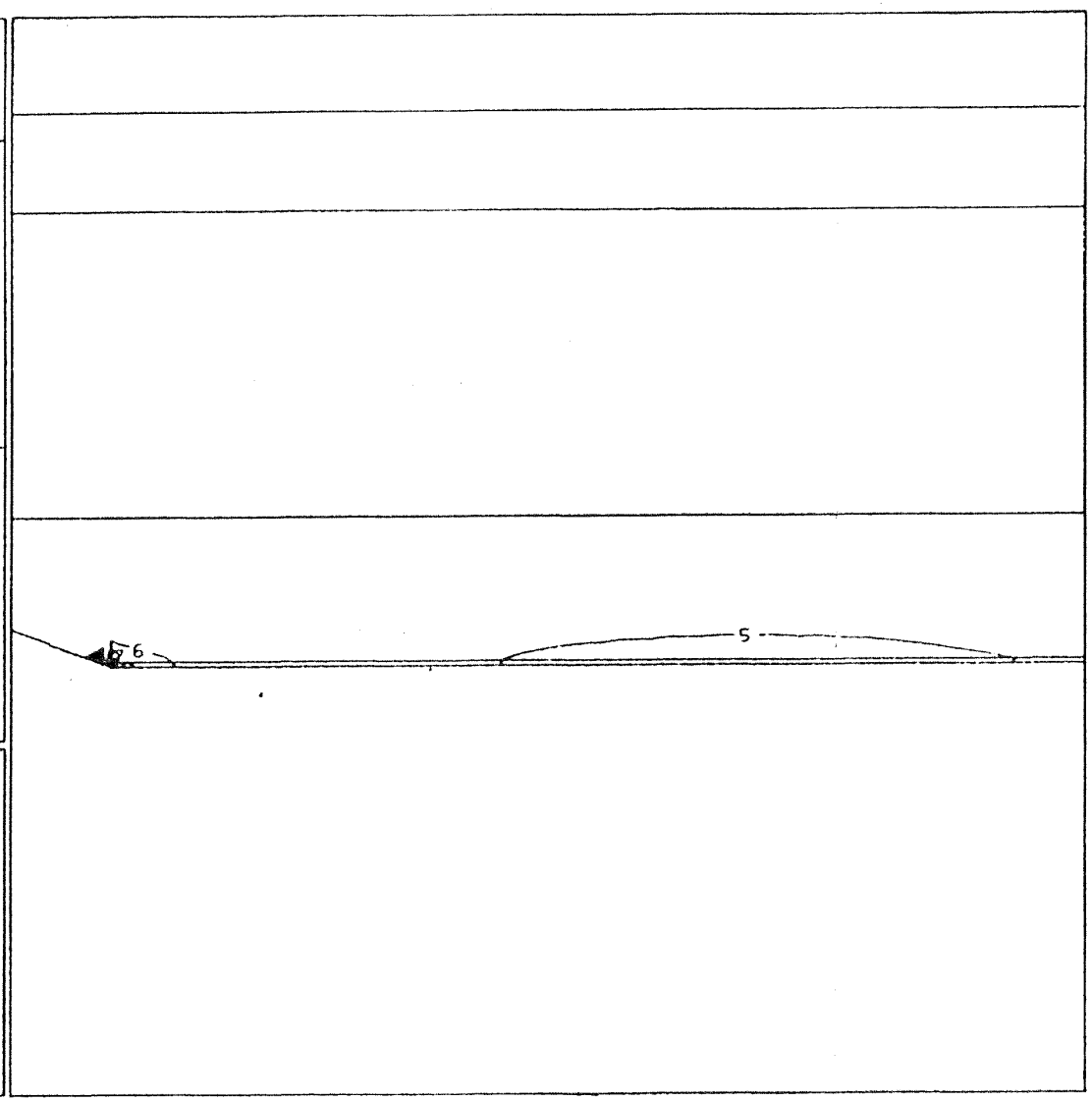
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

CONTRAINTE SY

1 :	-.162E+01
2 :	-.122E+01
3 :	-.825E+00
4 :	-.428E+00
5 :	-.298E-01
6 :	.368E+00
7 :	.766E+00
8 :	.116E+01
9 :	.156E+01
10 :	.196E+01

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0



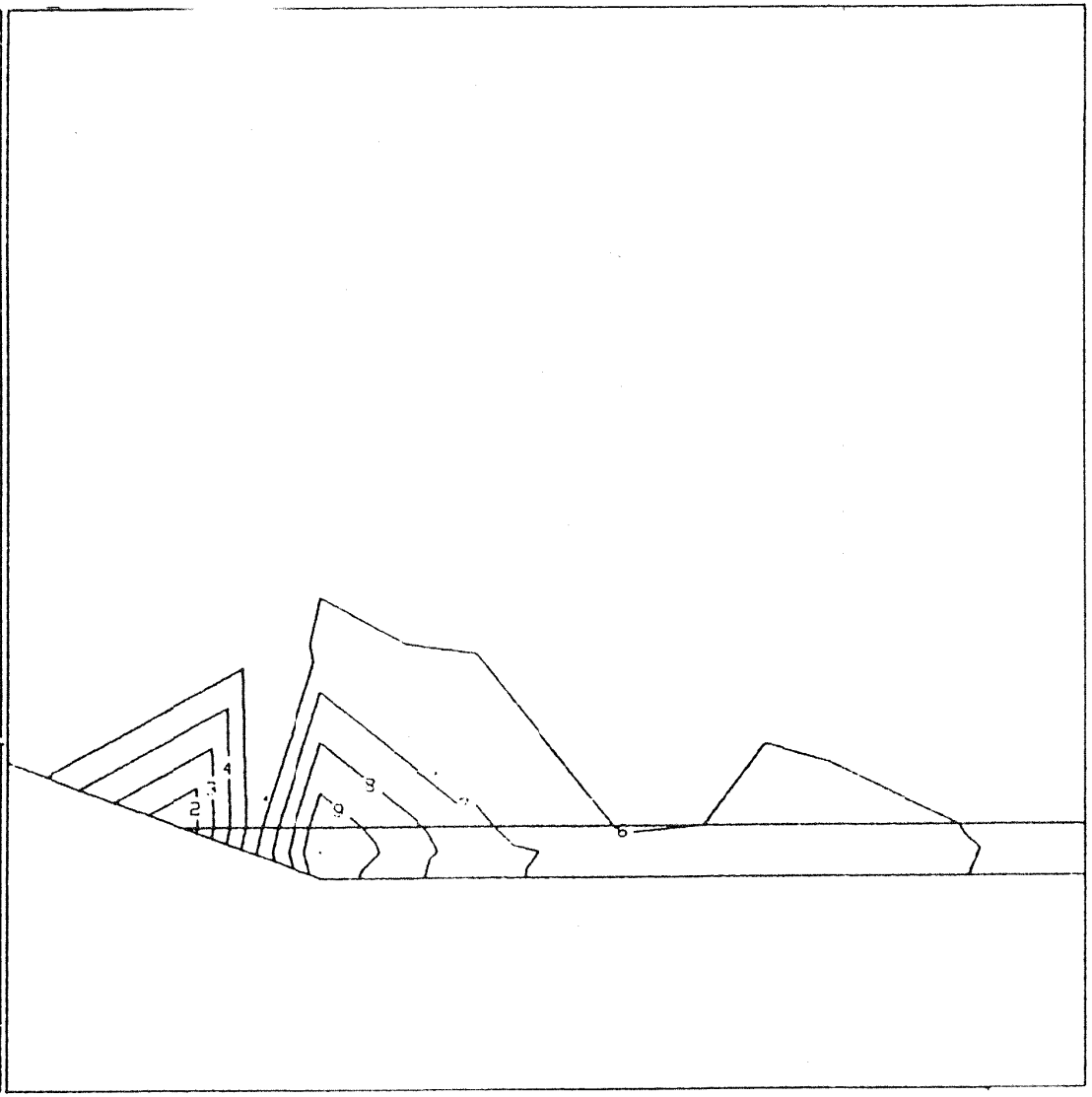
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

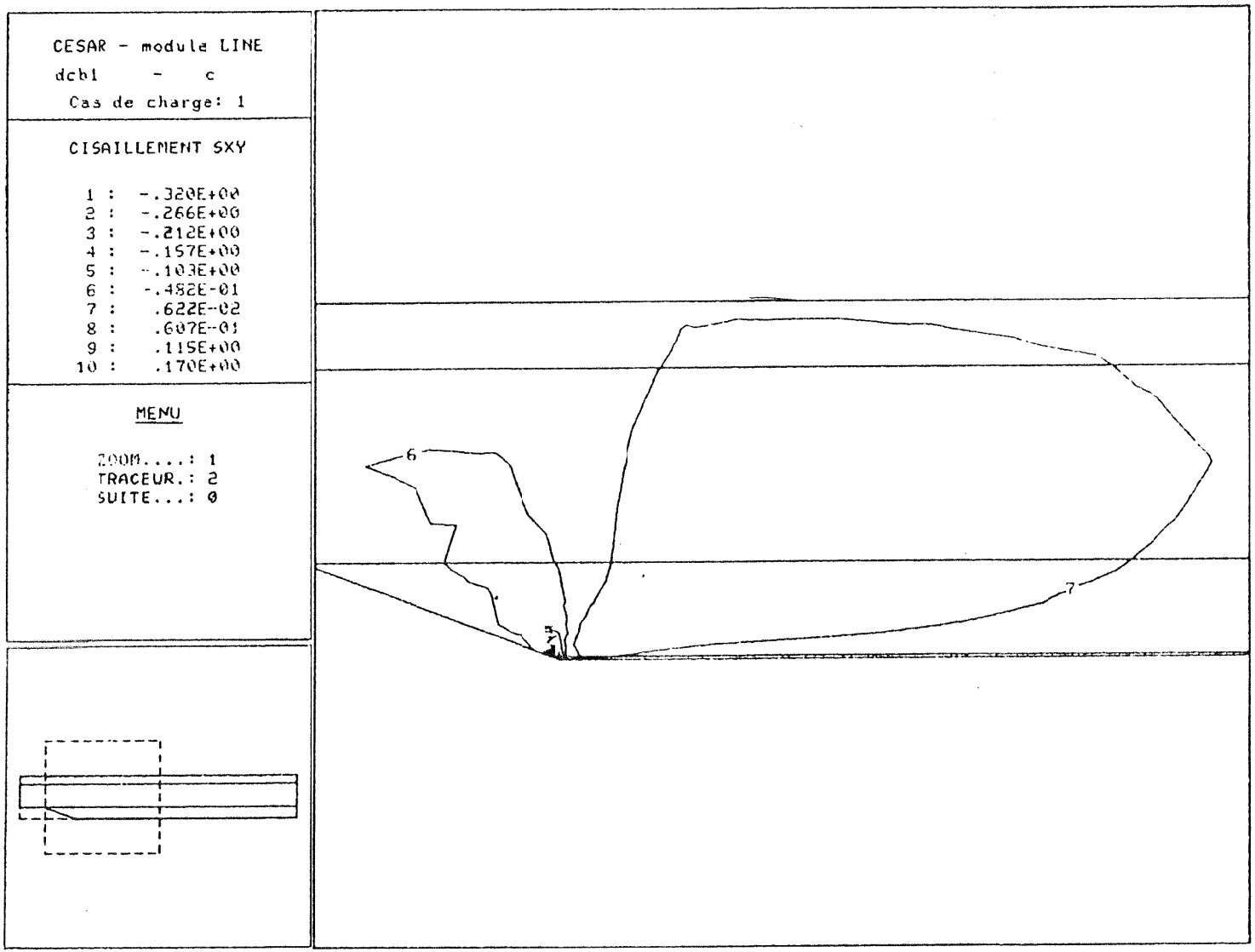
CONTRAINTE SY

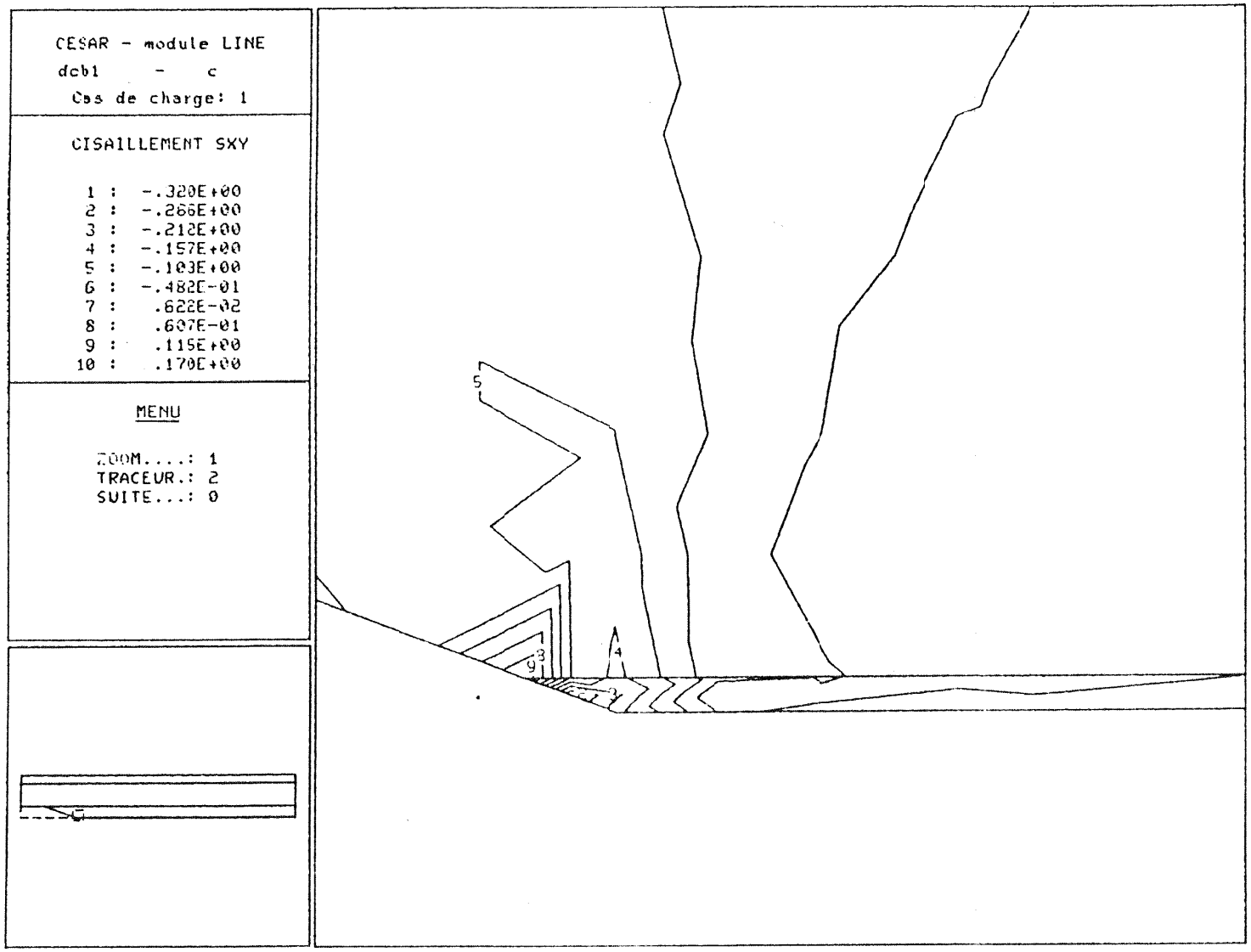
1 :	-.162E+01
2 :	-.122E+01
3 :	-.825E+00
4 :	-.428E+00
5 :	-.298E-01
6 :	.368E+00
7 :	.766E+00
8 :	.116E+01
9 :	.156E+01
10 :	.196E+01

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0




CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.320E+00
2 : -.266E+00
3 : -.212E+00
4 : -.157E+00
5 : -.103E+00
6 : -.482E-01
7 : .622E-02
8 : .607E-01
9 : .115E+00
10 : .170E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
6
7

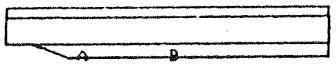

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.320E+00
2 : -.266E+00
3 : -.212E+00
4 : -.157E+00
5 : -.103E+00
6 : -.482E-01
7 : .622E-02
8 : .607E-01
9 : .115E+00
10 : .170E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
5
4
3
2
1

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

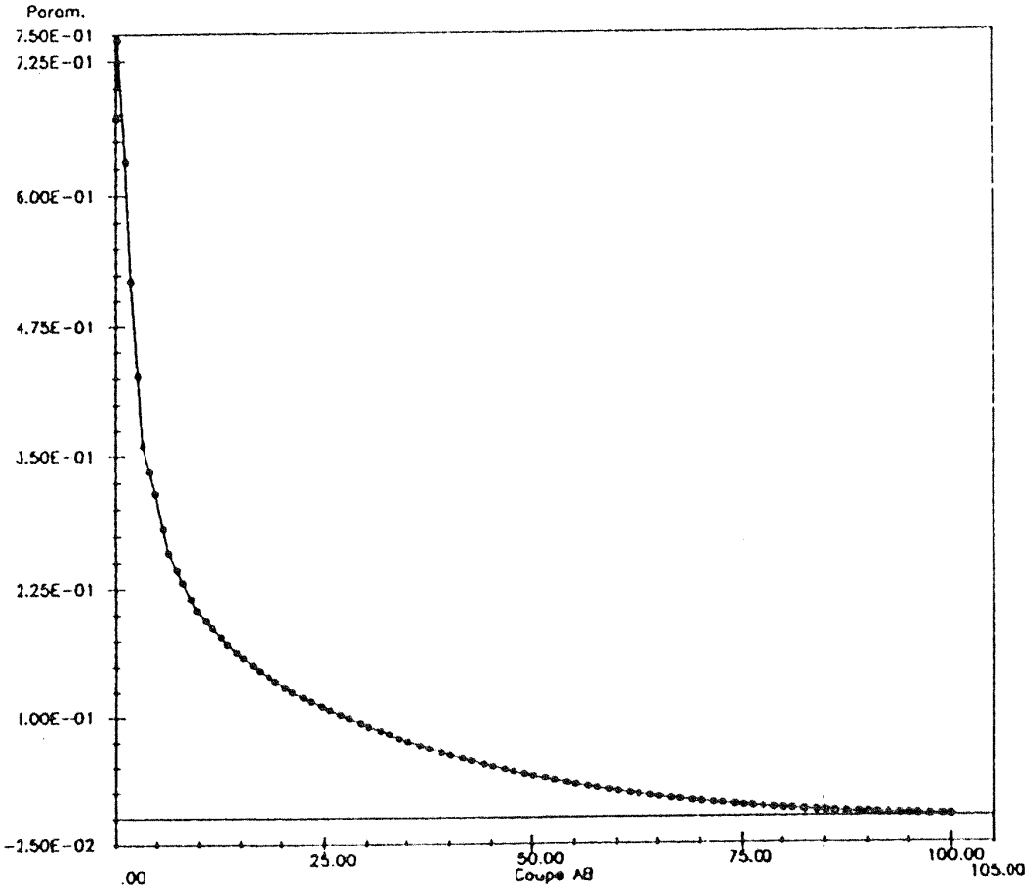
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE Sx

SUIVANT UNE COUPE

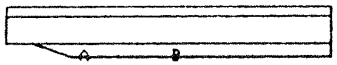


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

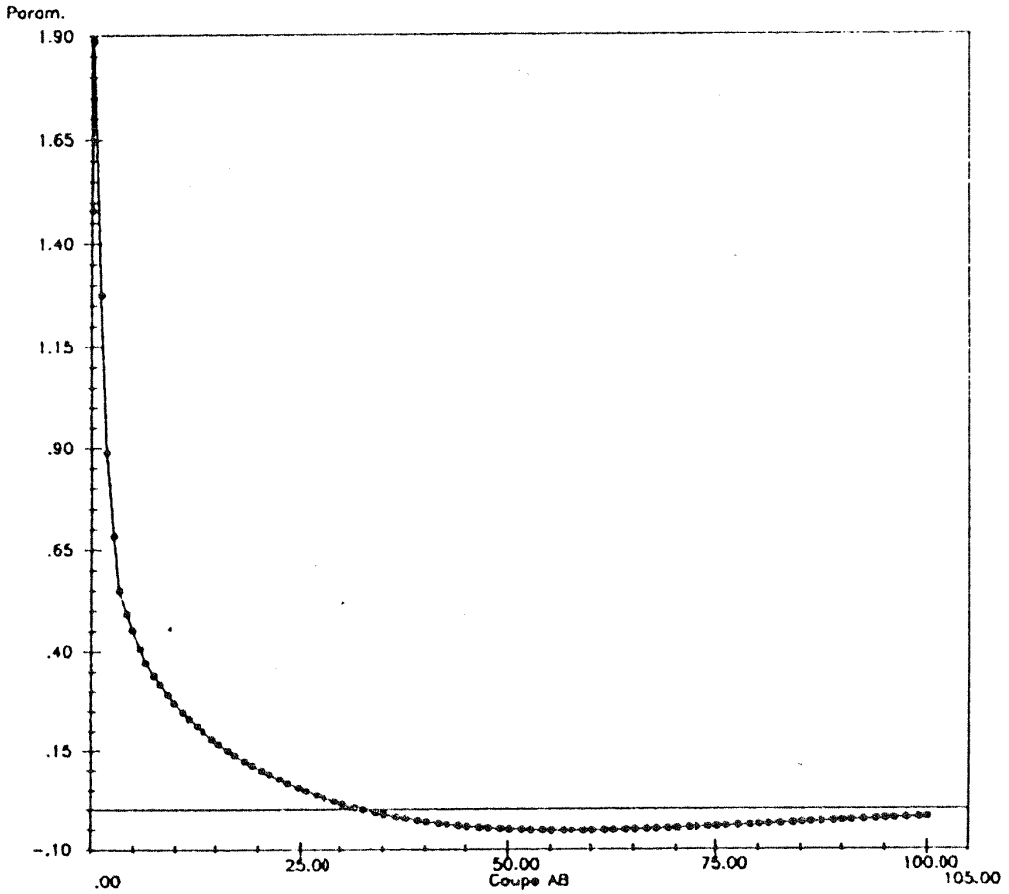
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE SY

SUIVANT UNE COUPE

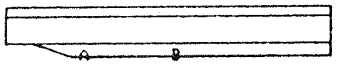


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

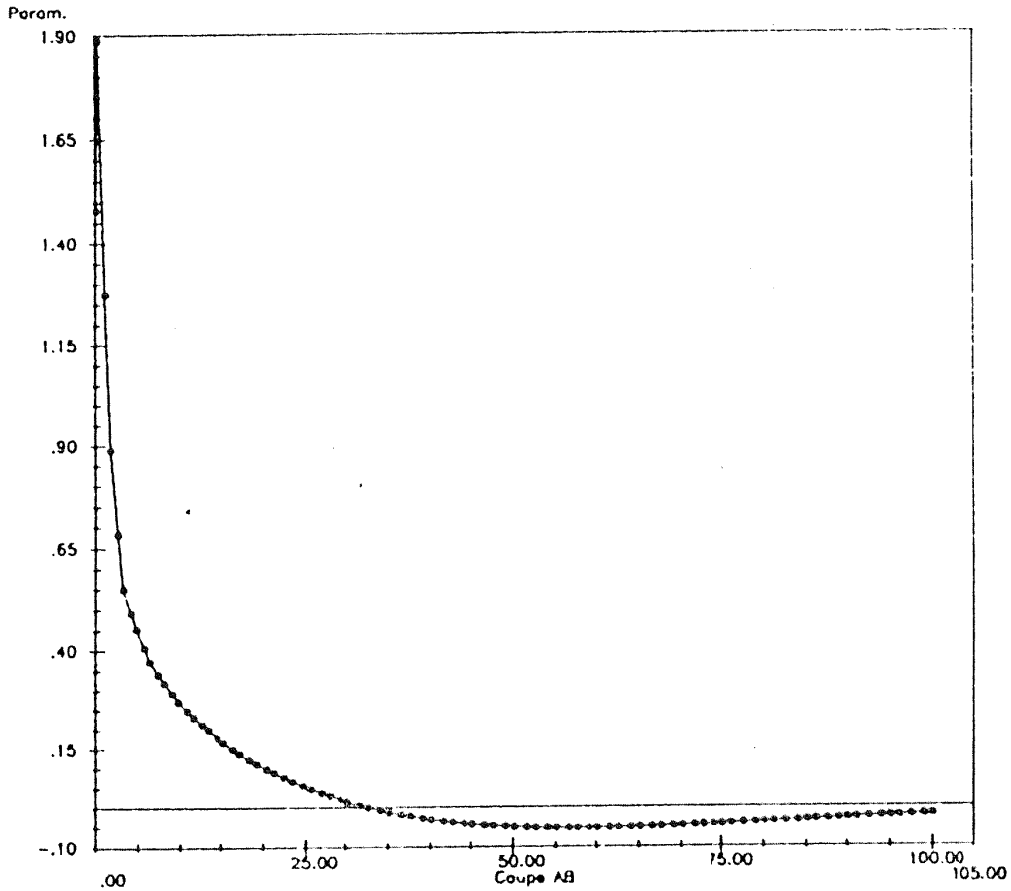
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



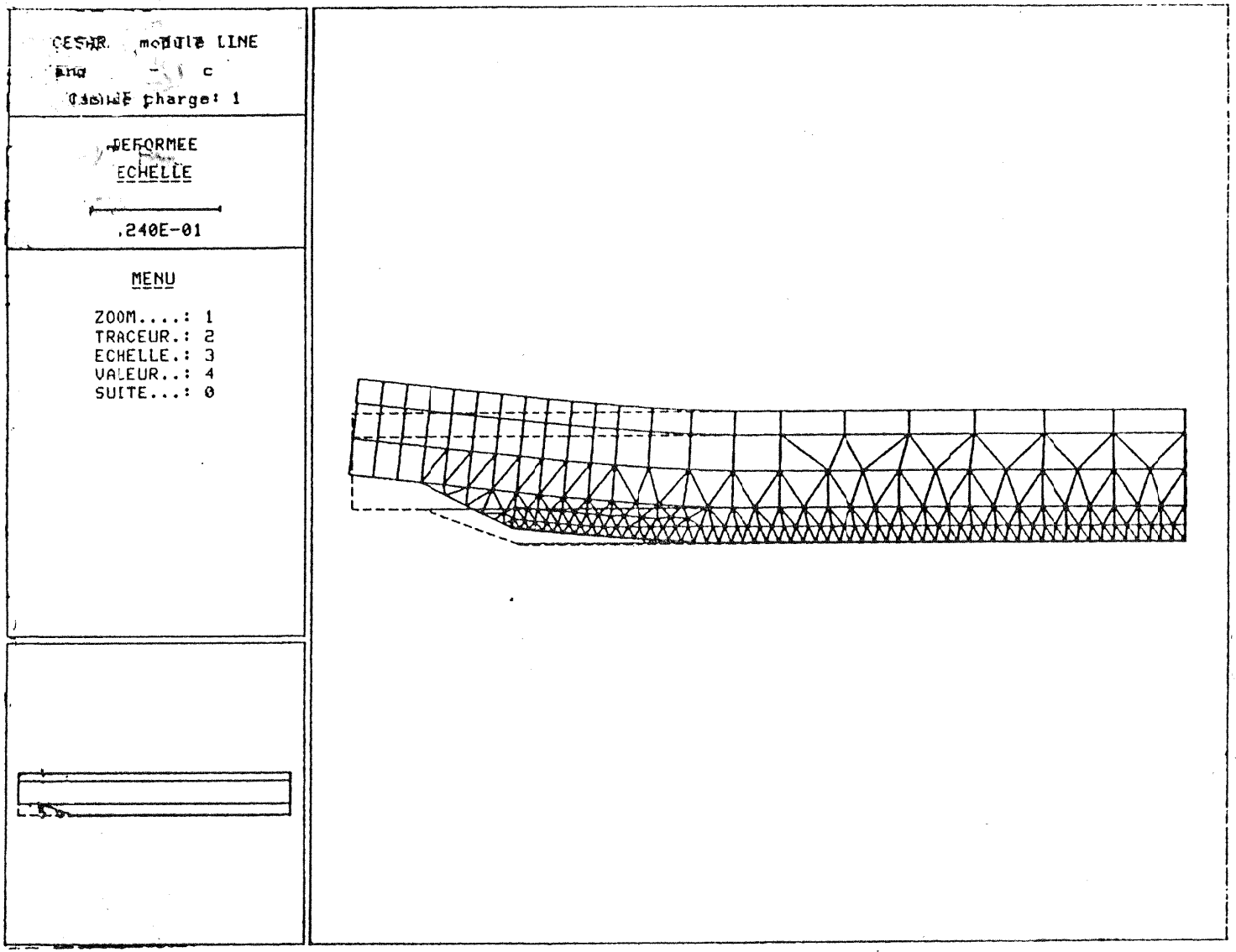
CONTRAINTE ST

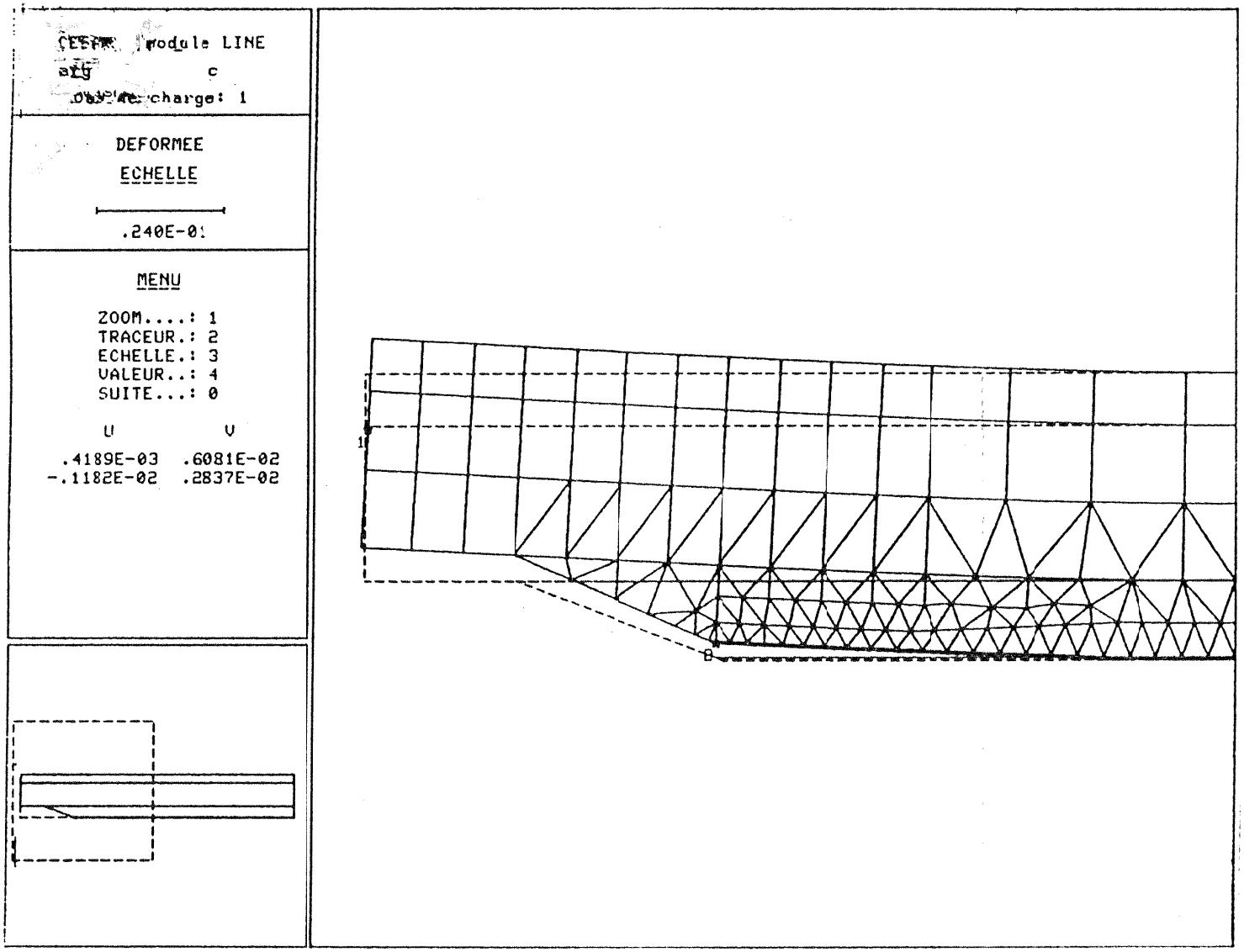
SUIVANT UNE COUPE



— ANEXO 3.4 —

— ARGAMASSA $a = 10,5\,cm$ —


CESAR module LINE
cas
cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.240E-01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


module LINE
c
charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.240E-01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0
U V
.4189E-03 .6081E-02
-.1182E-02 .2837E-02

CESAR - module LINE

arg - c

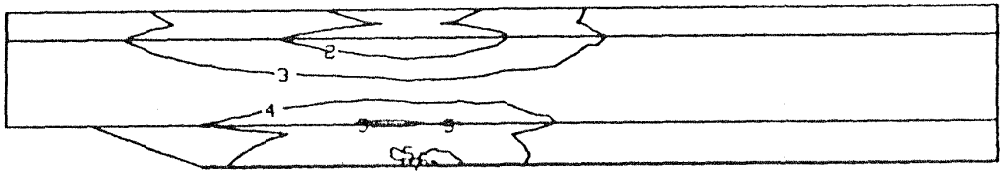
Cas de charge: 1

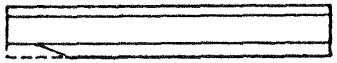
CONTRAINTE SX

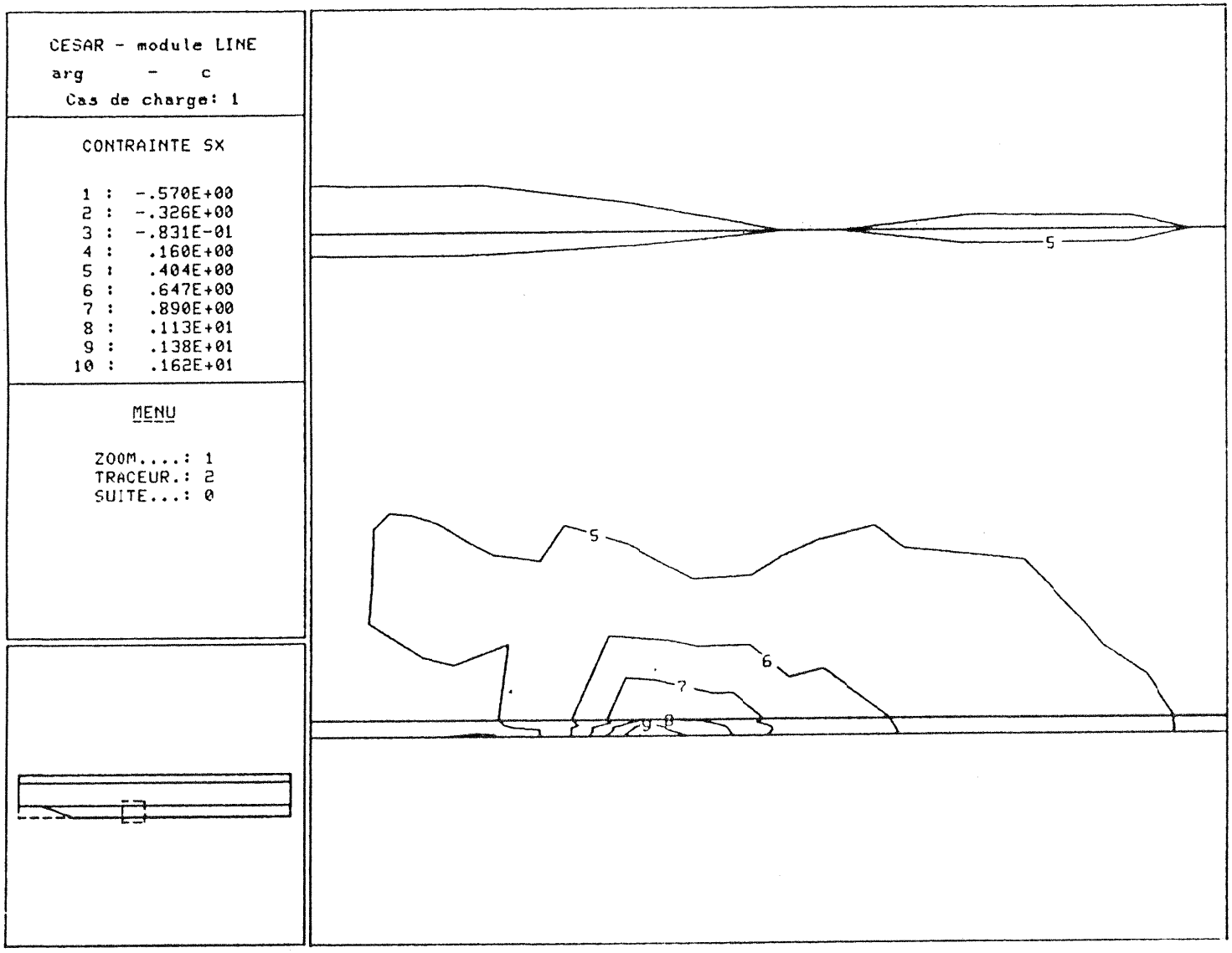
1 :	-.570E+00
2 :	-.326E+00
3 :	-.831E-01
4 :	.160E+00
5 :	.404E+00
6 :	.647E+00
7 :	.890E+00
8 :	.113E+01
9 :	.138E+01
10 :	.162E+01

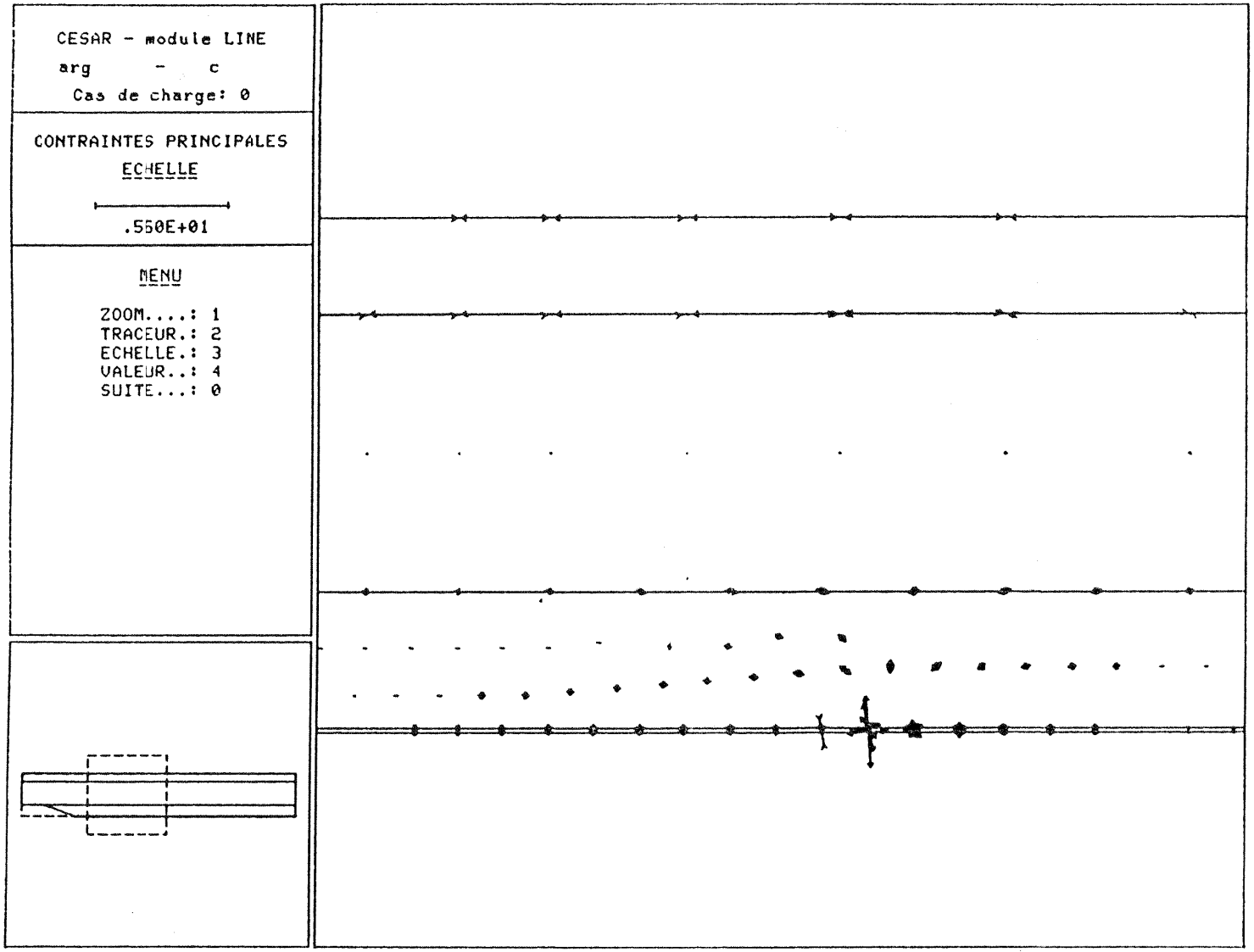
MENU

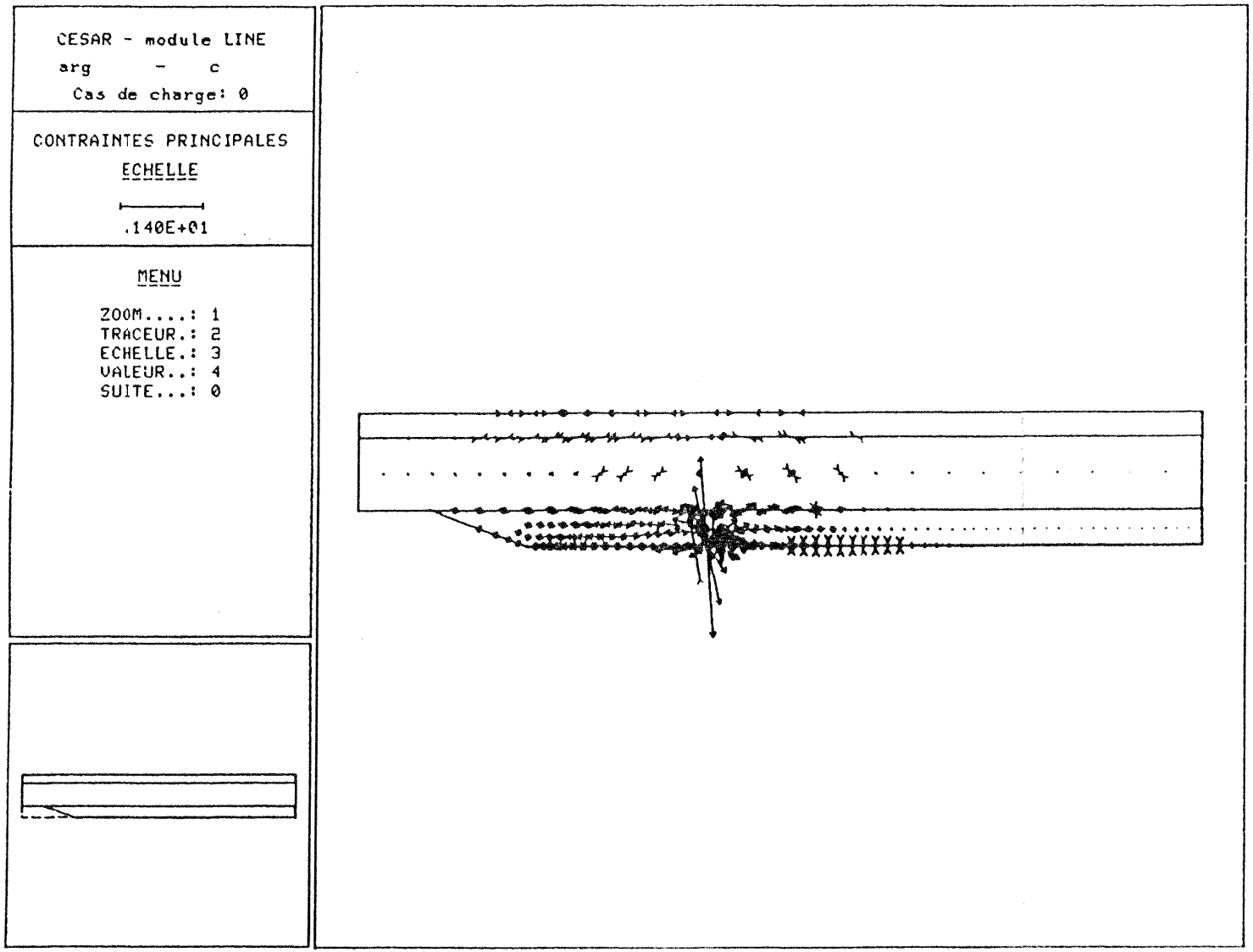
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0

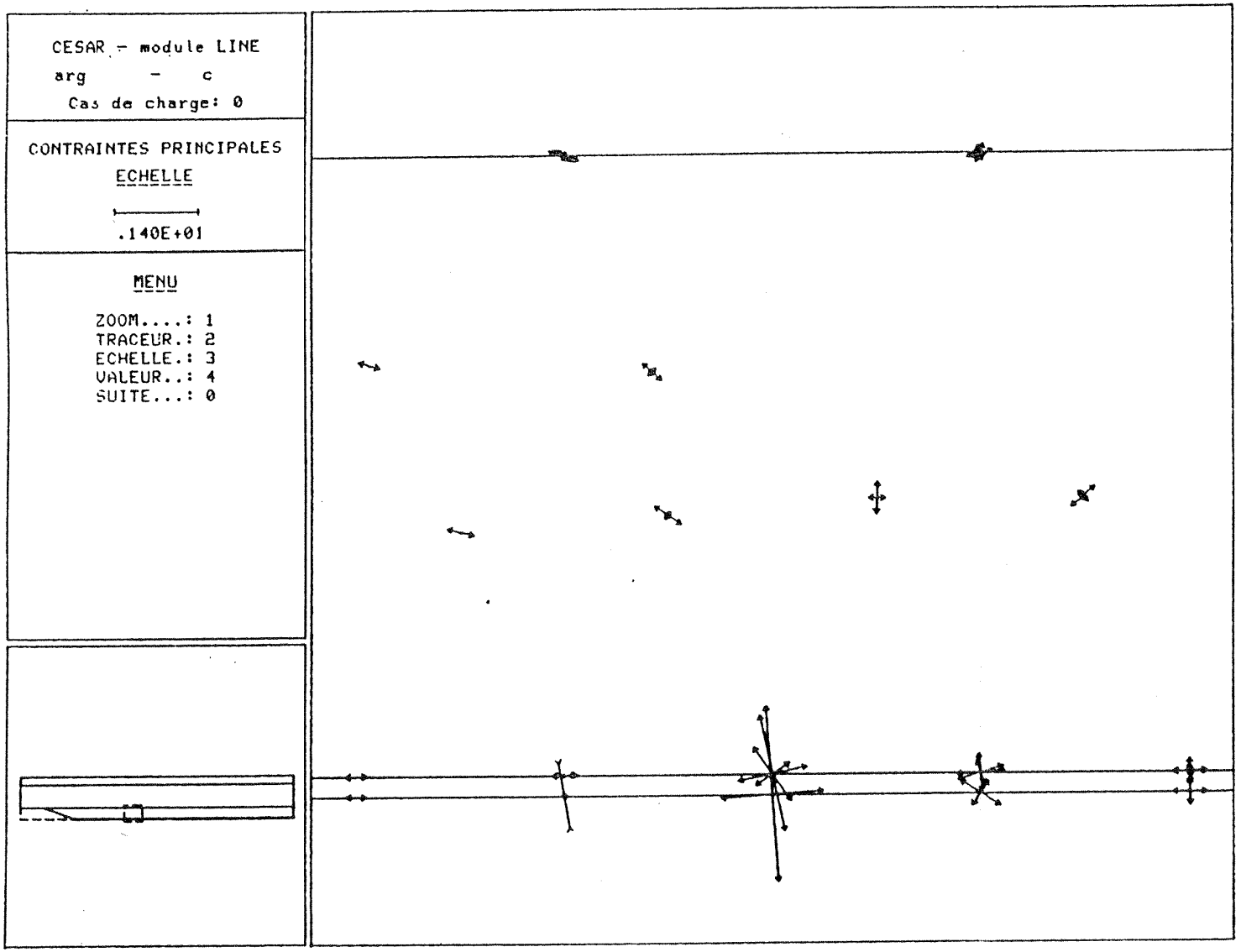


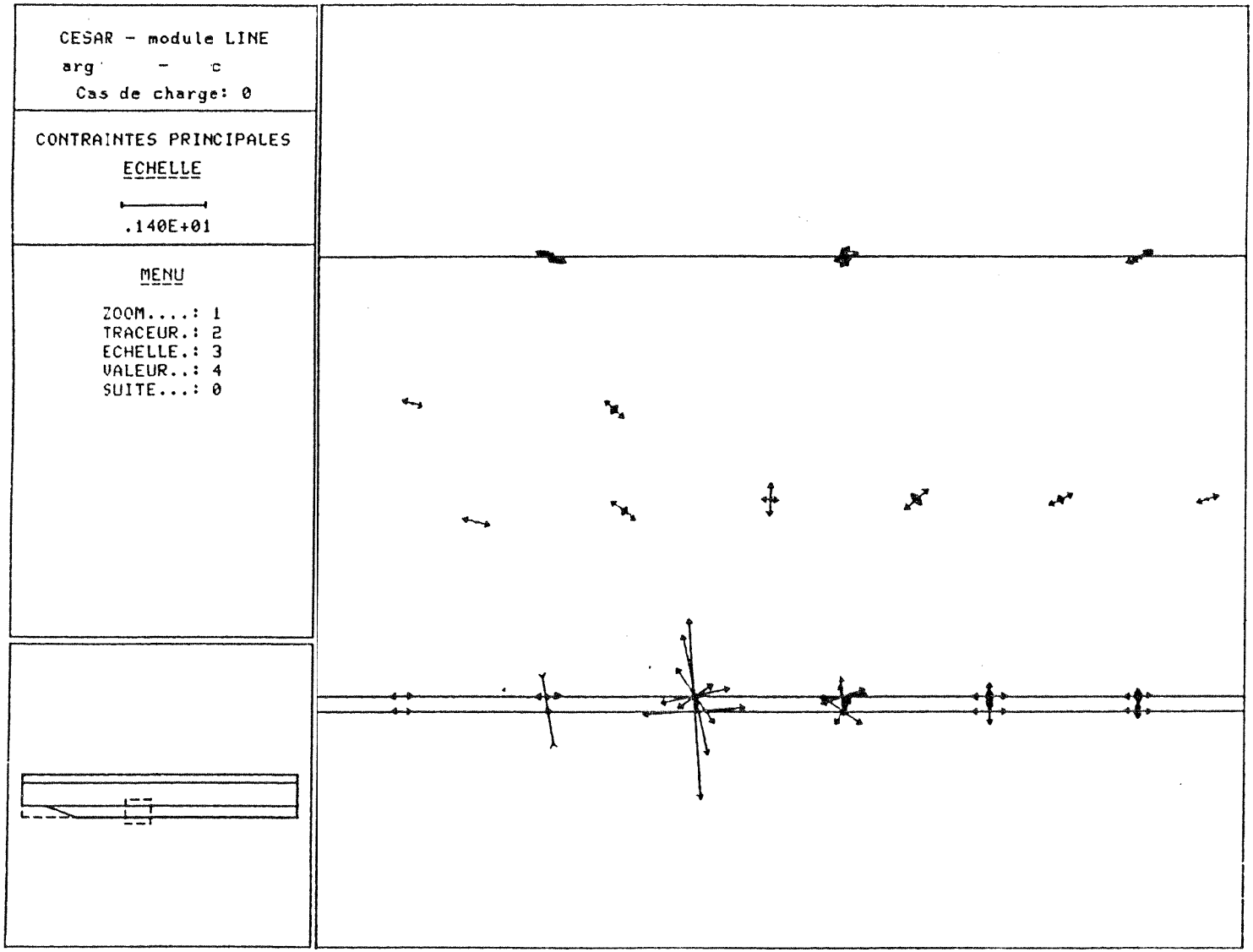


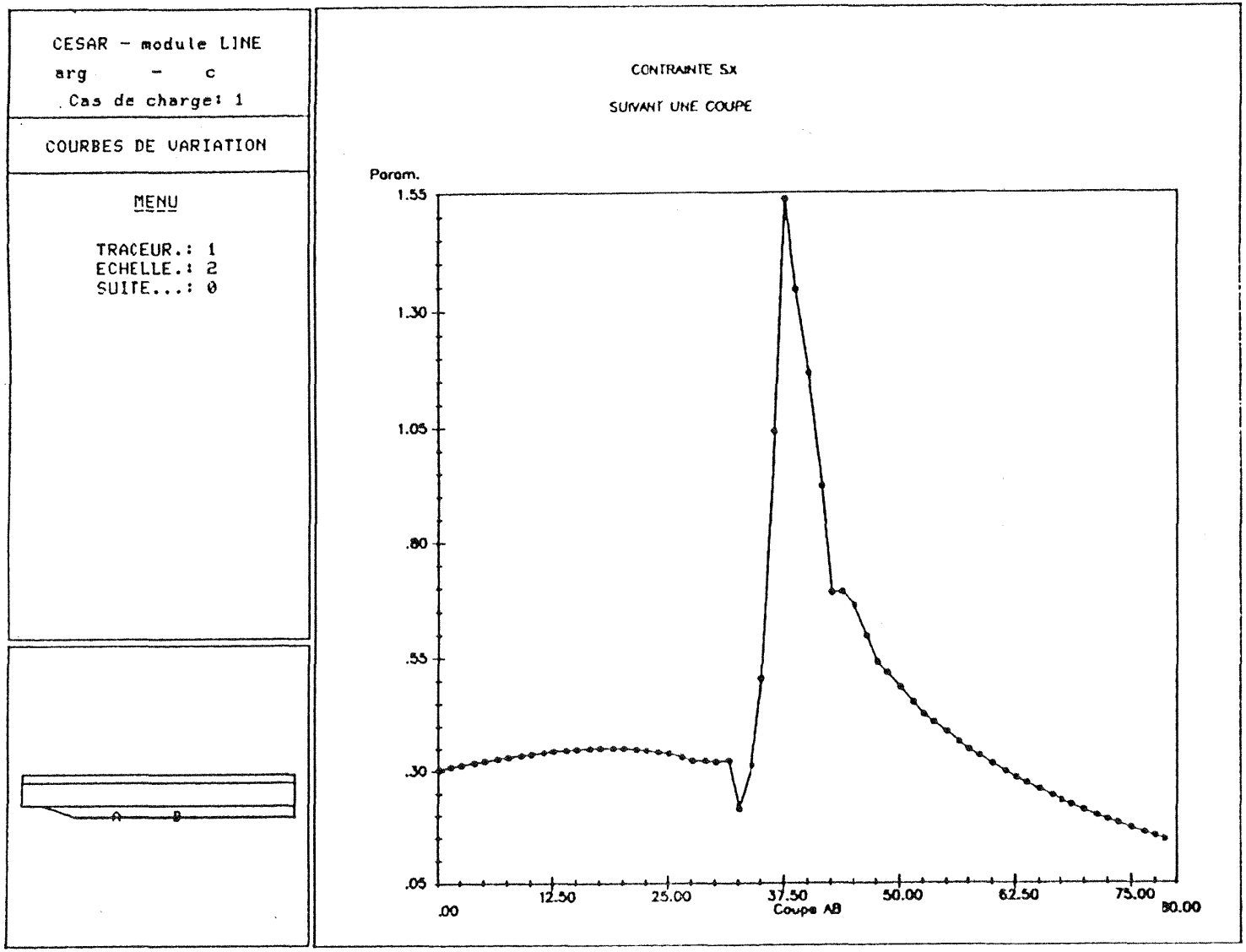

CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.570E+00
2 : -.326E+00
3 : -.831E-01
4 : .160E+00
5 : .404E+00
6 : .647E+00
7 : .890E+00
8 : .113E+01
9 : .138E+01
10 : .162E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
5
5
6
7
8
9


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.550E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.140E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.140E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.140E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
. Cas de charge: 1
COURBES DE VARIATION
MENU
TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0
A
B
CONTRAINTE Sx
SUIVANT UNE COUPE
Param.
1.55
1.30
1.05
.80
.55
.30
.05
.00
12.50
25.00
37.50
50.00
62.50
75.00
80.00
Coupe AB

CESAR - module LINE

arg - c

Cas de charge: 1

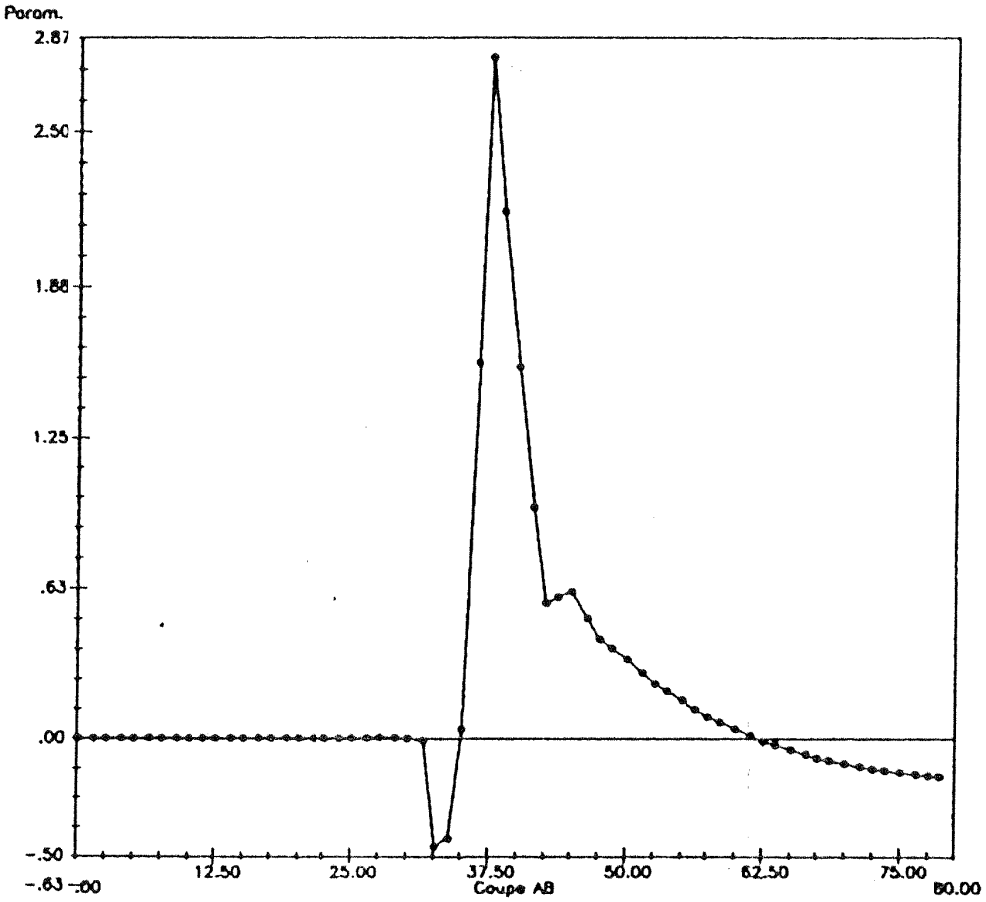
COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0

CONTRAINTE SY

SUIVANT UNE COUPE



CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

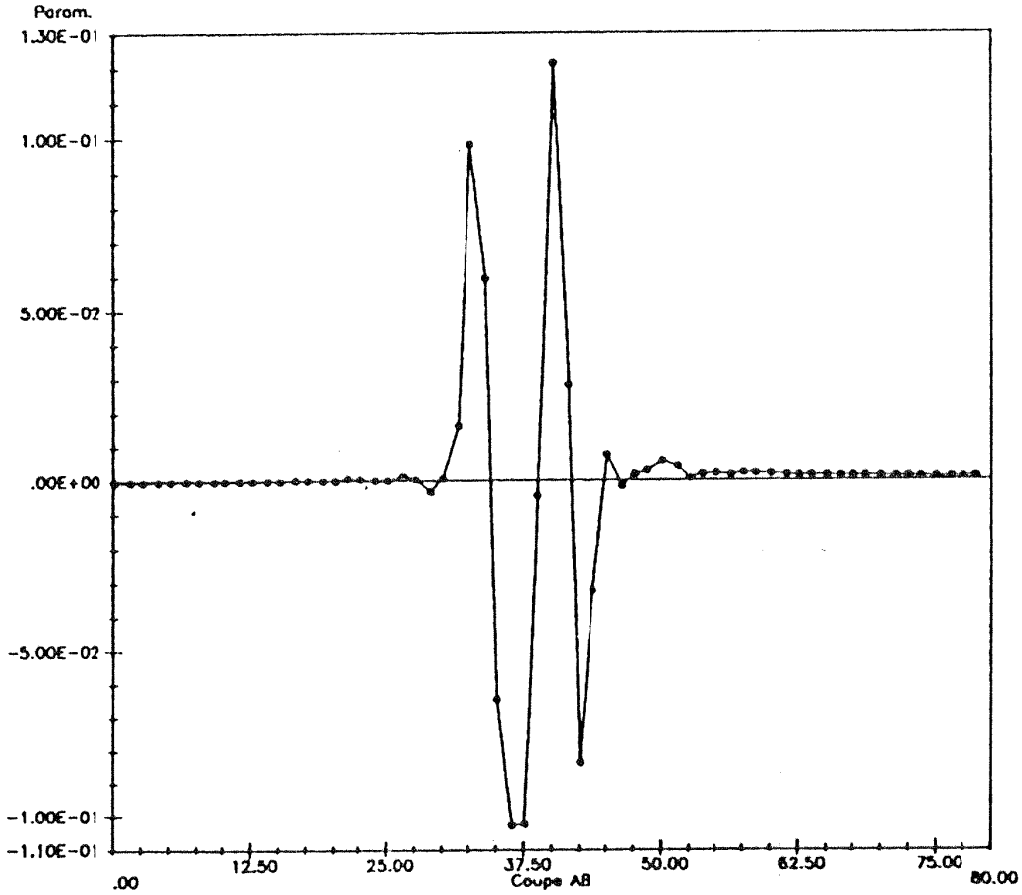
COURBES DE VARIATION

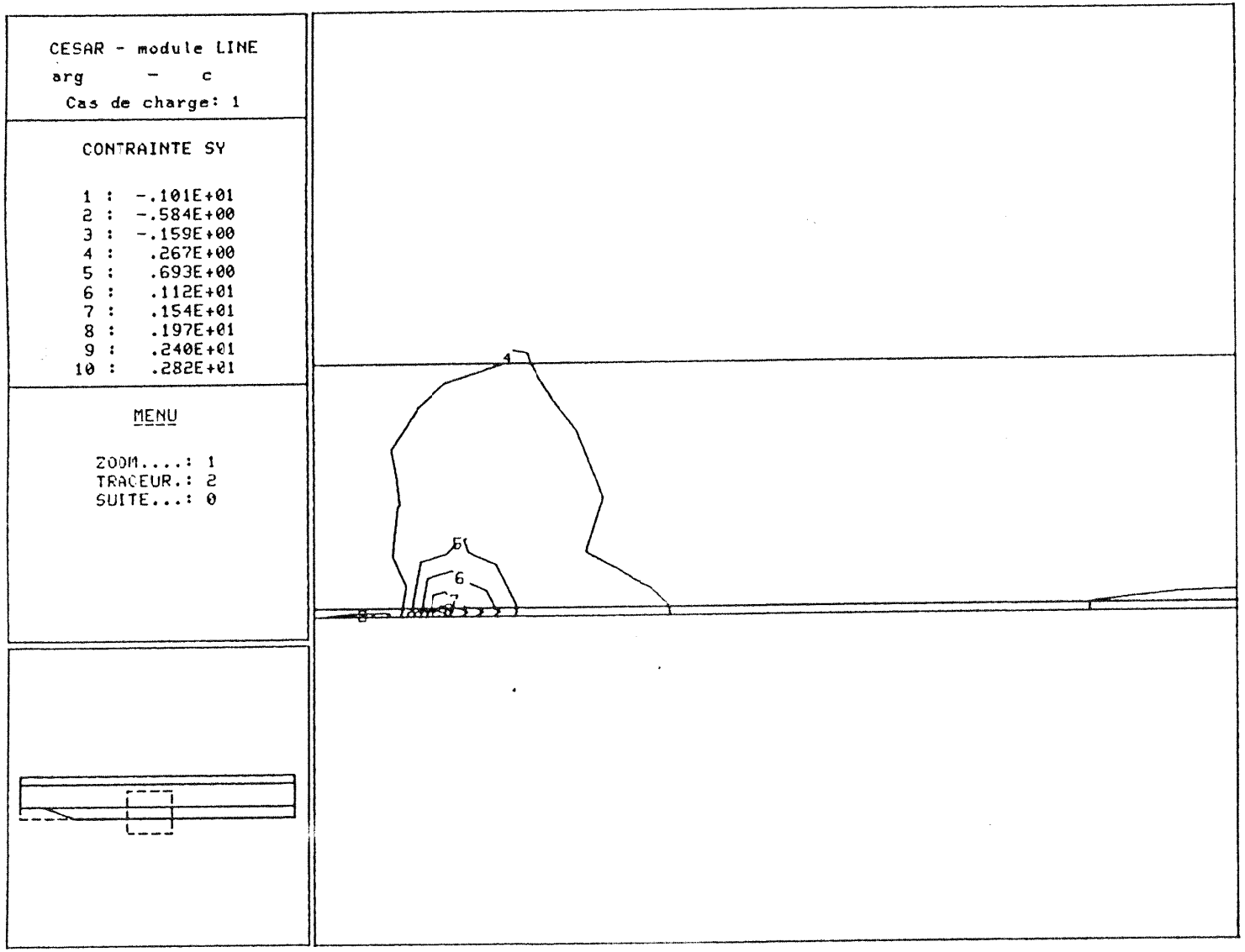
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0

CISAILLEMENT SXY

SUIVANT UNE COUPE




CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.101E+01
2 : -.584E+00
3 : -.159E+00
4 : .267E+00
5 : .693E+00
6 : .112E+01
7 : .154E+01
8 : .197E+01
9 : .240E+01
10 : .282E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
4
5
6
7
8

CESAR - module LINE

arg - c

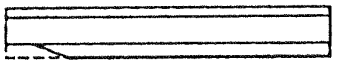
Cas de charge: 1

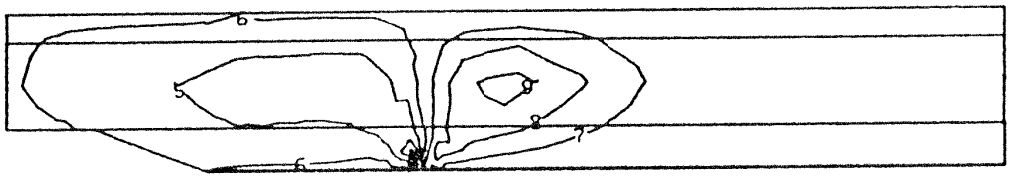
CISAILLEMENT SXY

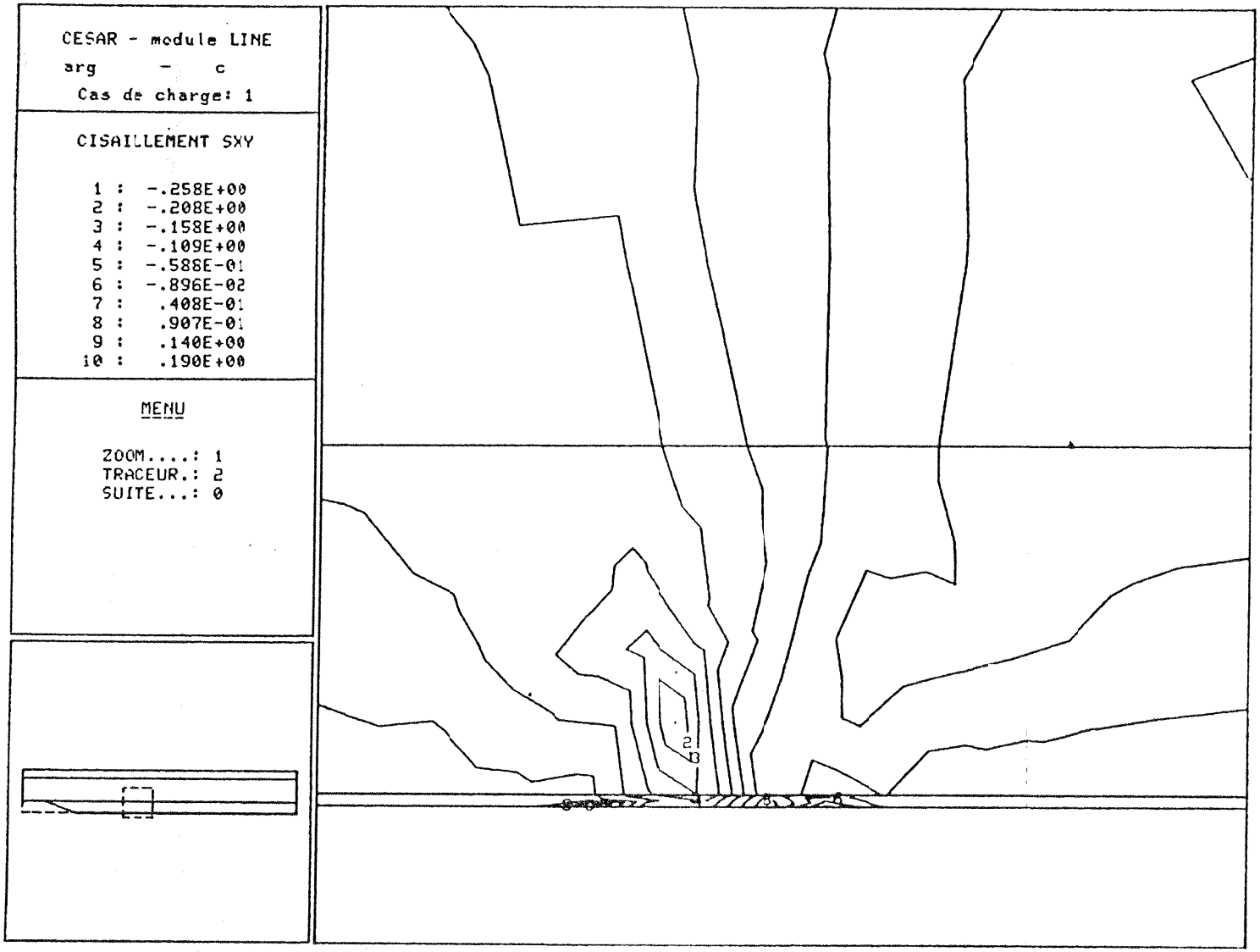
1 :	-.258E+00
2 :	-.208E+00
3 :	-.158E+00
4 :	-.109E+00
5 :	-.588E-01
6 :	-.896E-02
7 :	.408E-01
8 :	.907E-01
9 :	.140E+00
10 :	.190E+00

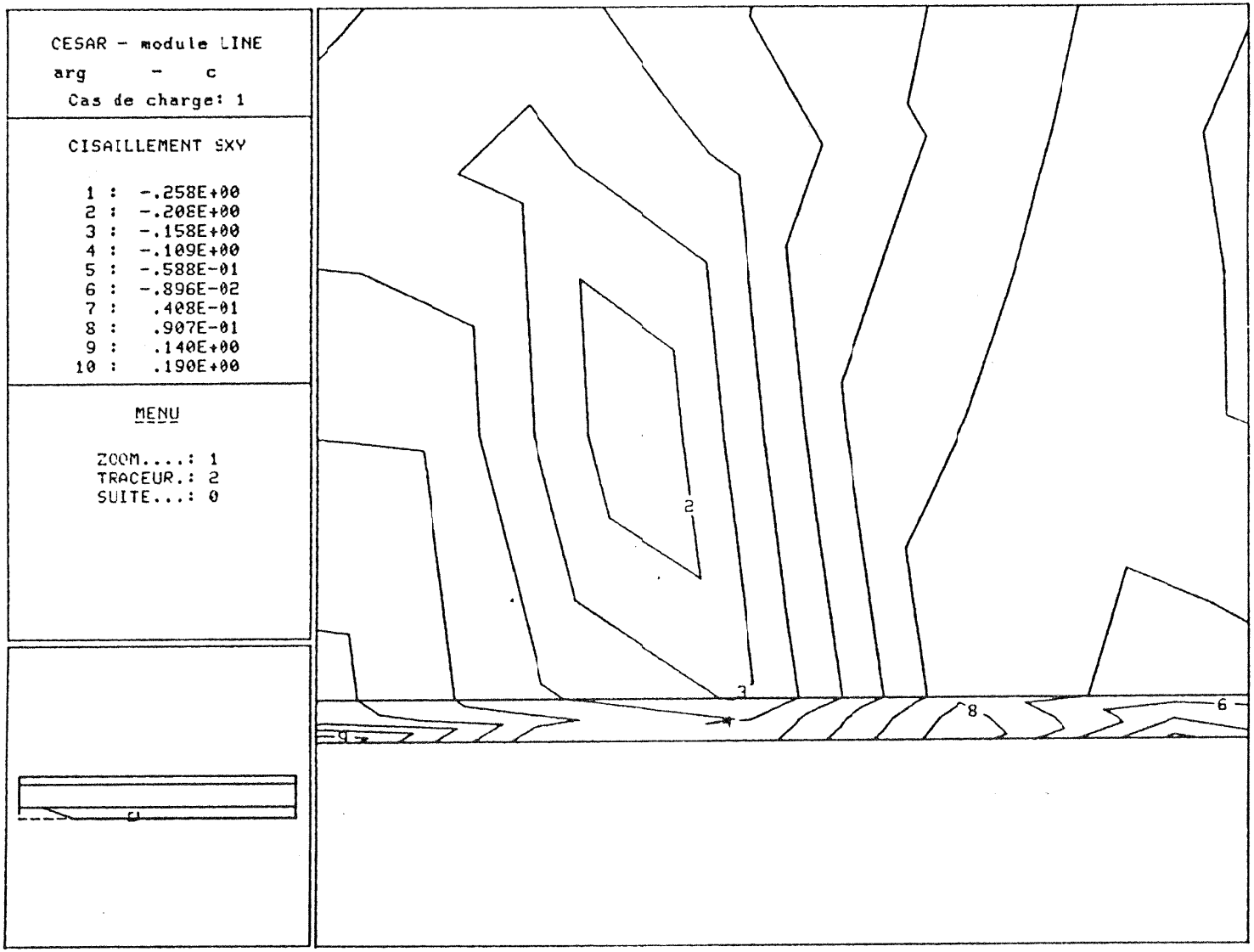
MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0



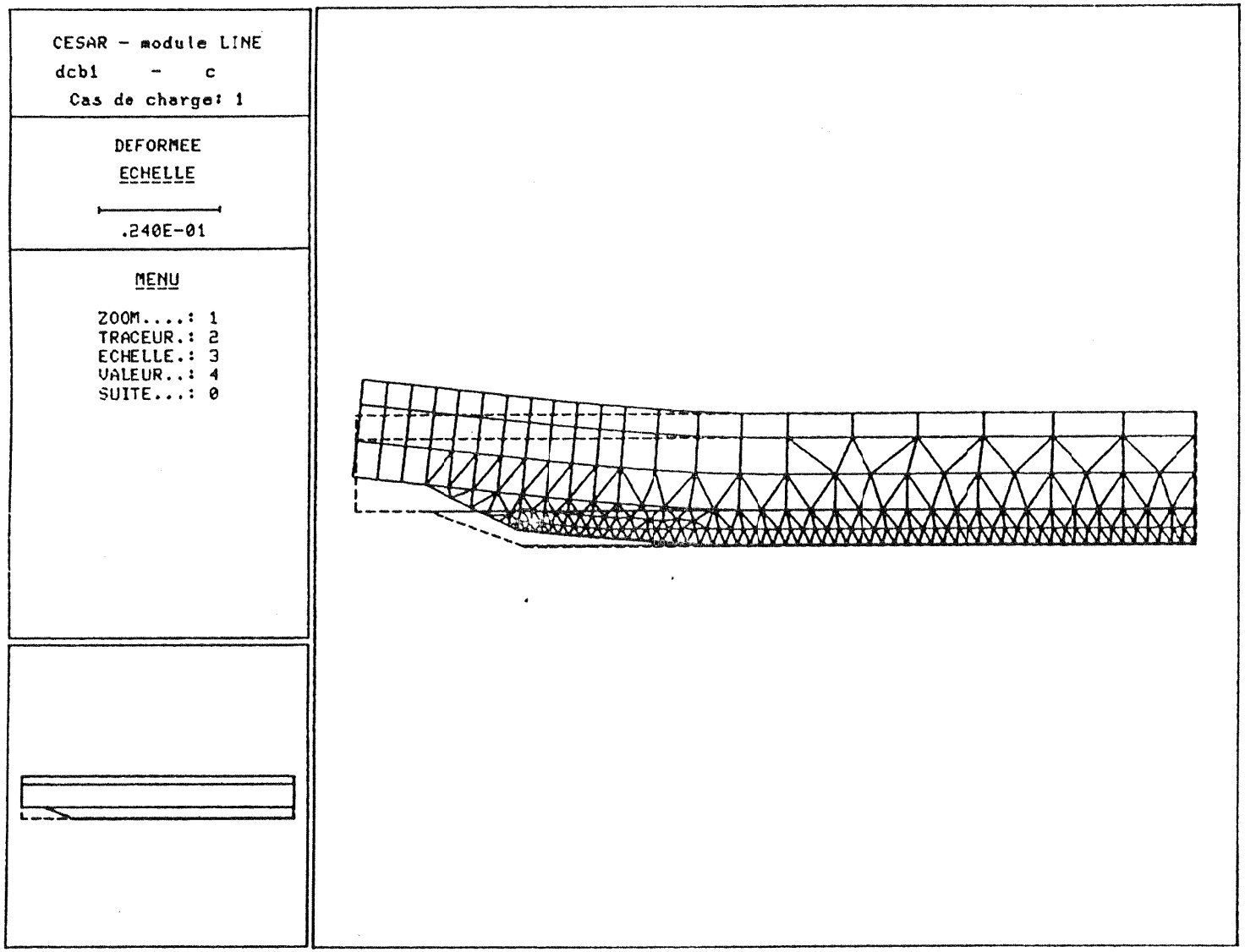



CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.258E+00
2 : -.208E+00
3 : -.158E+00
4 : -.109E+00
5 : -.588E-01
6 : -.896E-02
7 : .408E-01
8 : .907E-01
9 : .140E+00
10 : .190E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.258E+00
2 : -.20SE+00
3 : -.158E+00
4 : -.109E+00
5 : -.588E-01
6 : -.896E-02
7 : .408E-01
8 : .907E-01
9 : .140E+00
10 : .190E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
2
3
8
6
9

— ANEXO 3.5 —

— ARGAMASSA + COLA $a = 10,5\,cm$ —


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.240E-01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

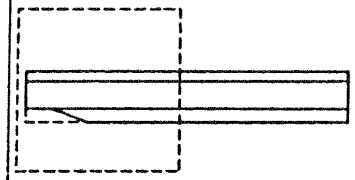
DEFORMEE
ECHELLE

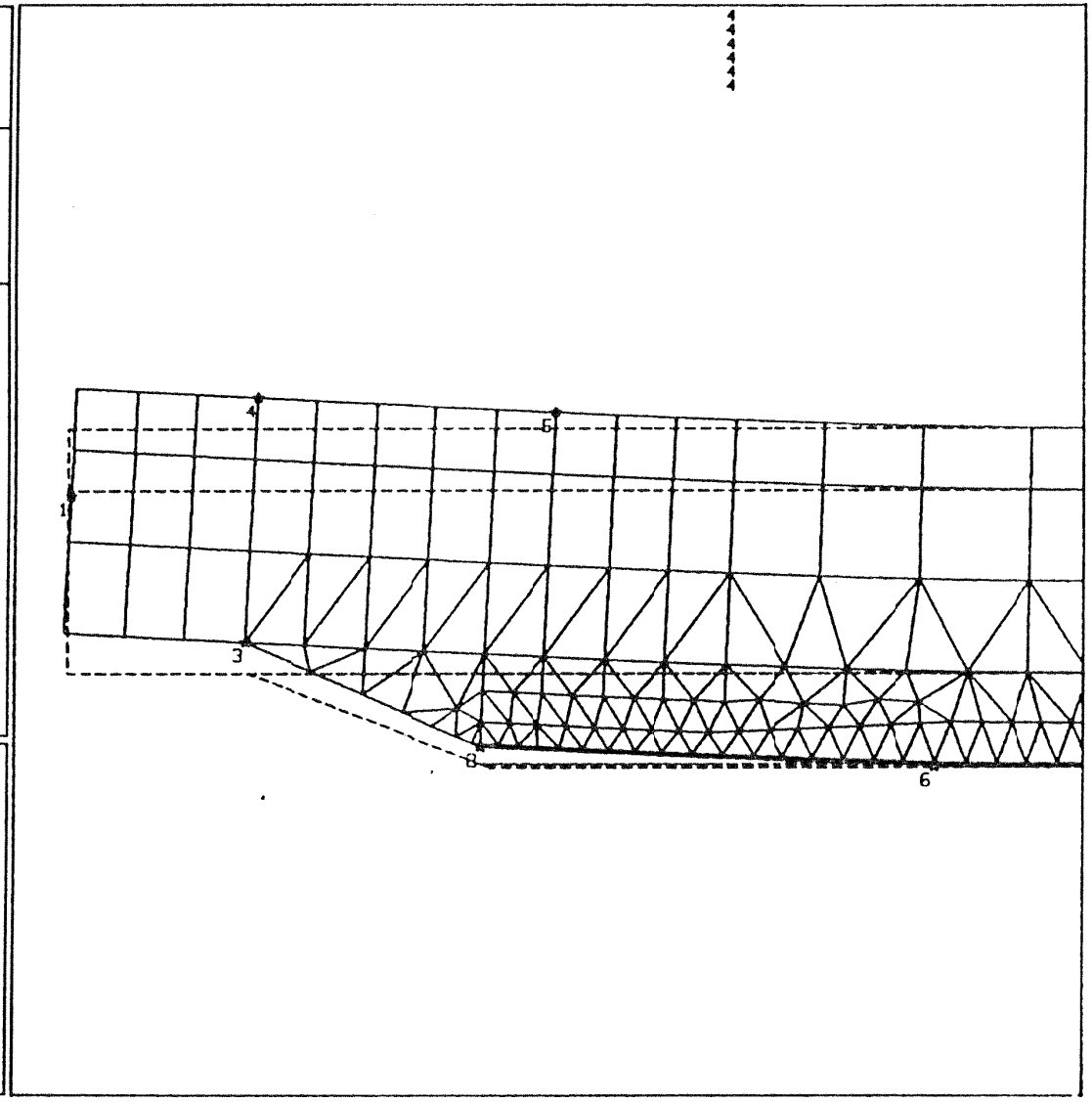
.240E-01

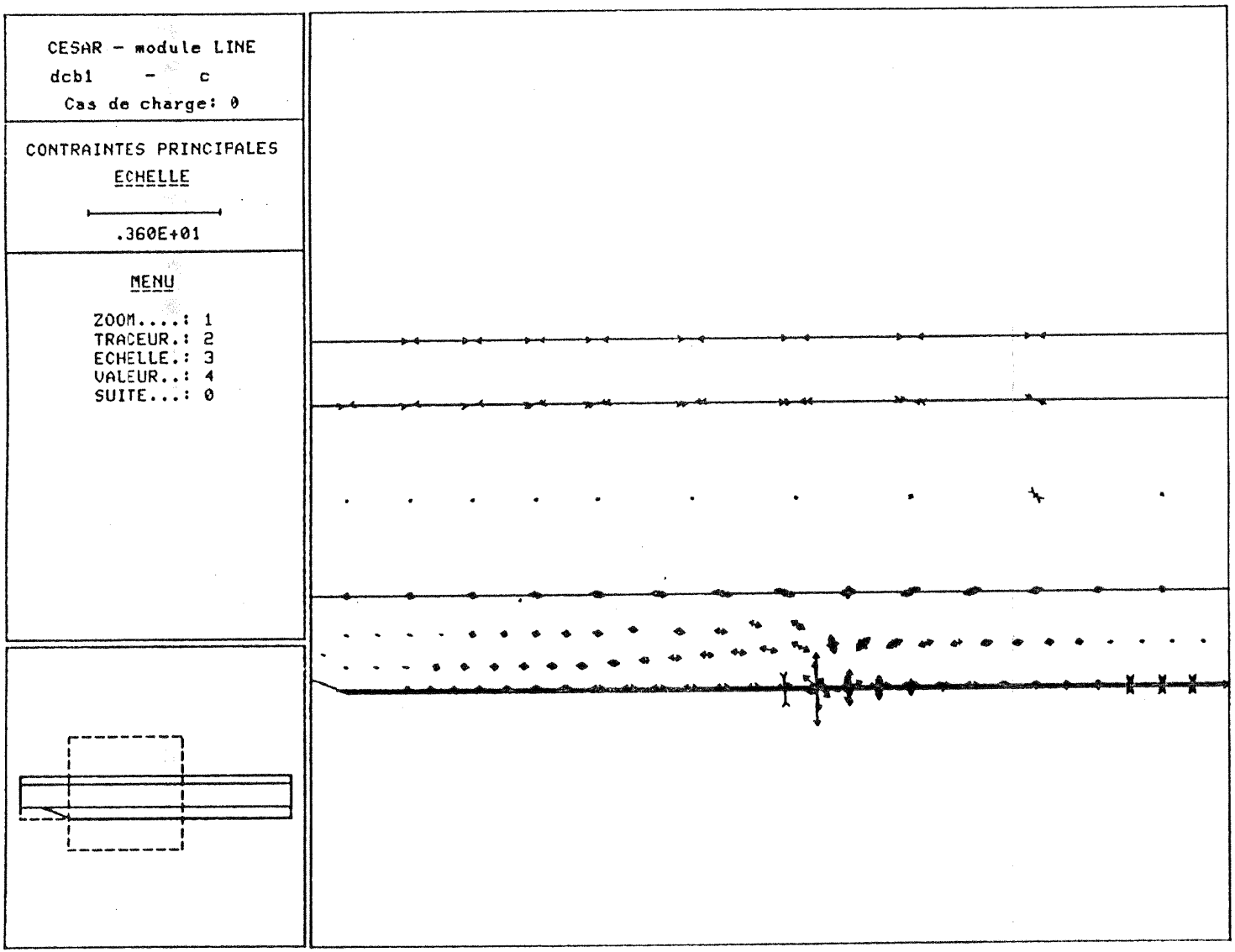
MENU

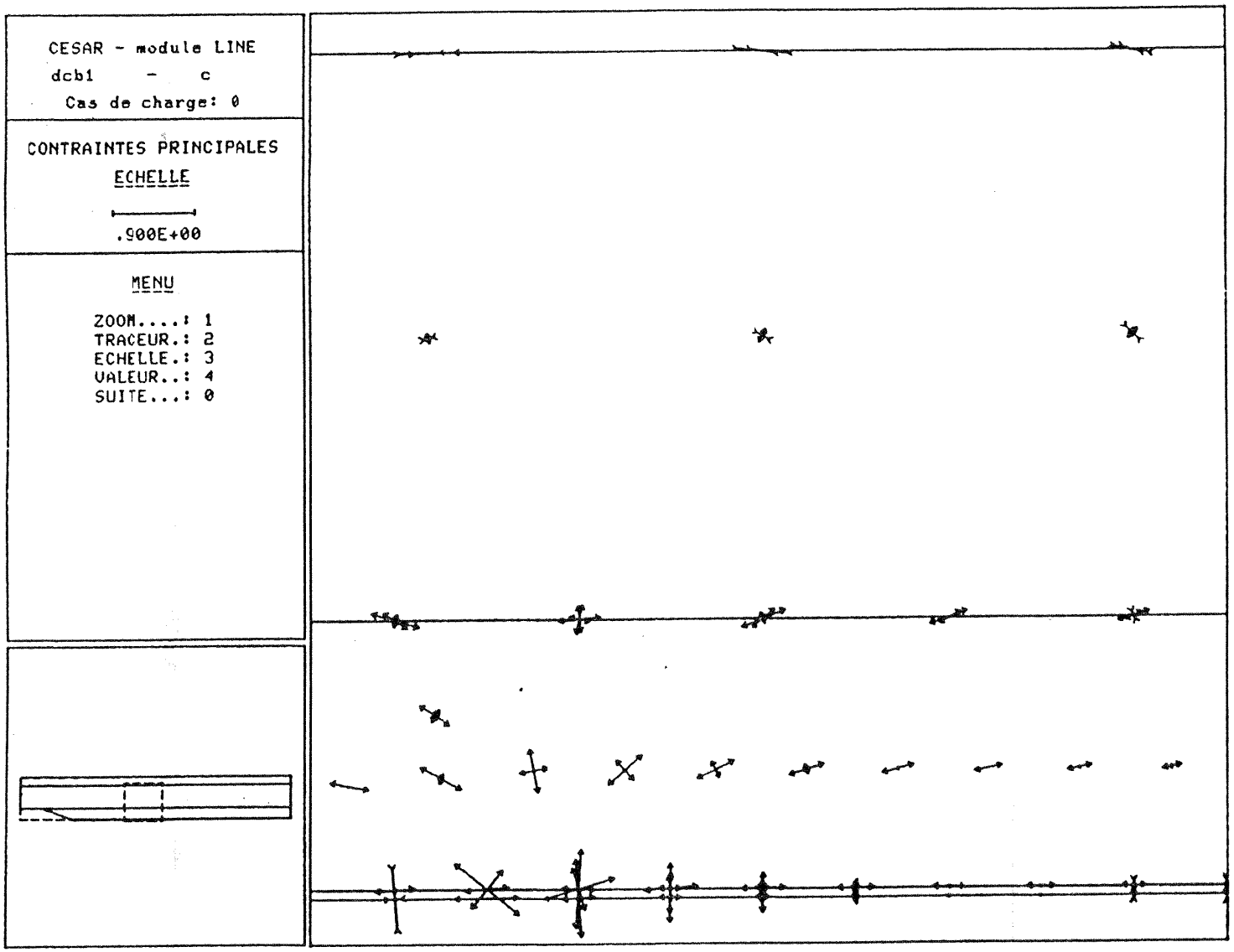
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

U	V
.4375E-03	.6481E-02
-.1251E-02	.3077E-02
-.6618E-03	.4991E-02
.1285E-02	.5010E-02
.1143E-02	.2629E-02
-.6412E-03	.0000E+00






CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.360E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.900E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

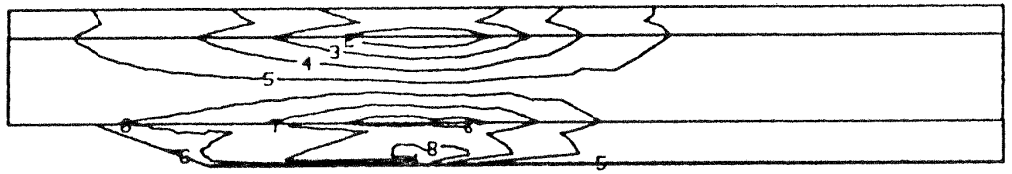
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

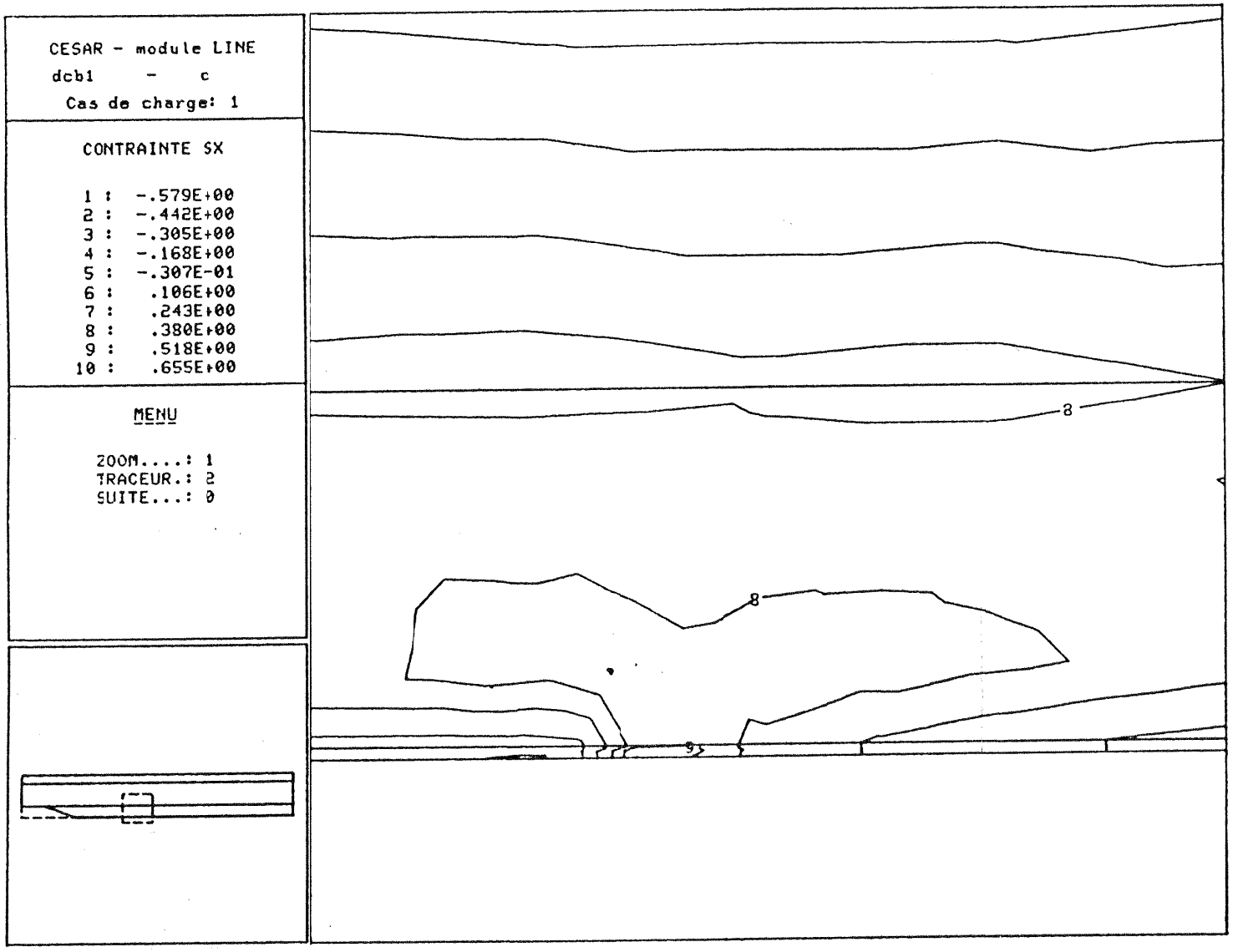
CONTRAINTE SX

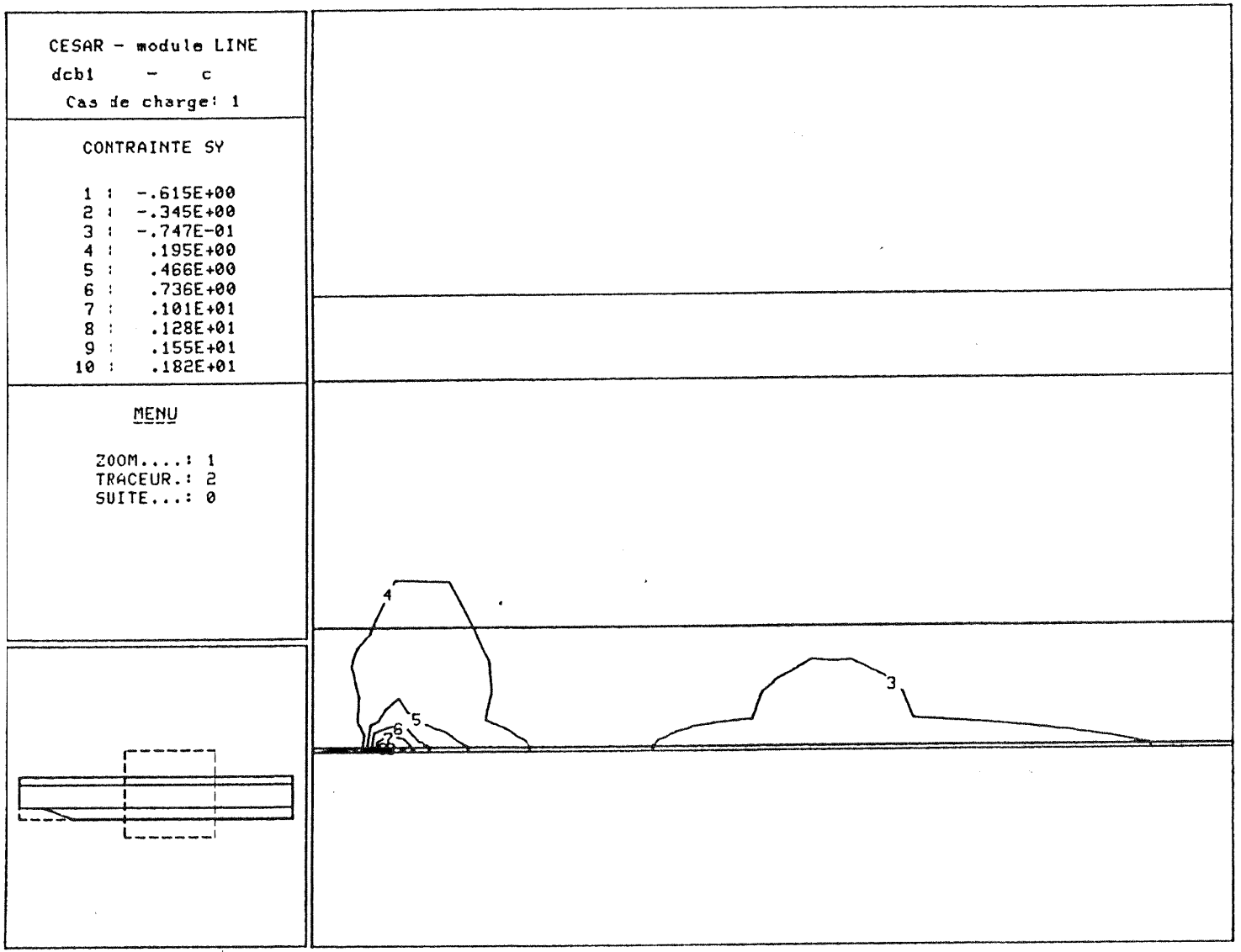
1 :	-.579E+00
2 :	-.442E+00
3 :	-.305E+00
4 :	-.168E+00
5 :	-.307E-01
6 :	.106E+00
7 :	.243E+00
8 :	.380E+00
9 :	.518E+00
10 :	.655E+00

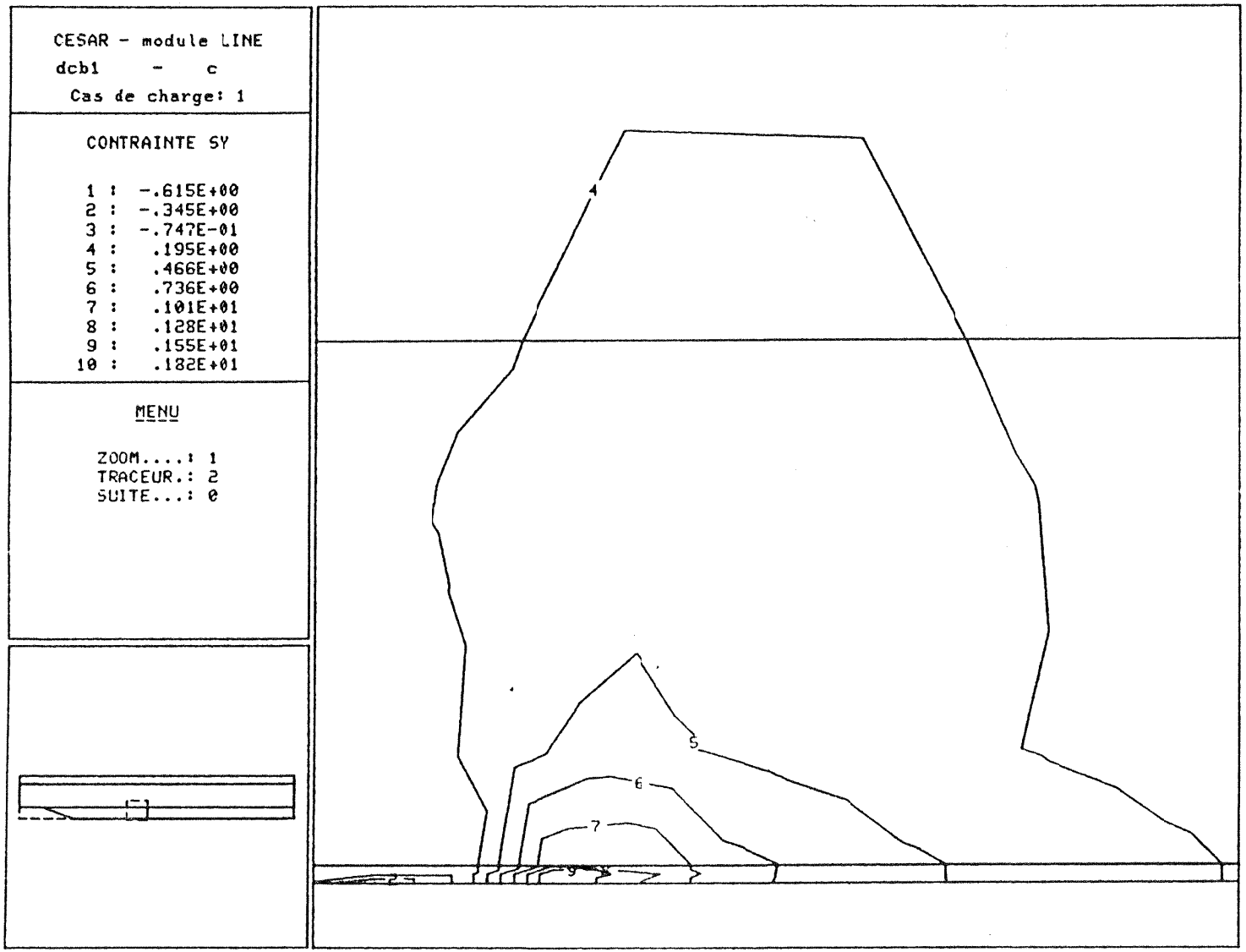
MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0




CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.579E+00
2 : -.442E+00
3 : -.305E+00
4 : -.168E+00
5 : -.307E-01
6 : .106E+00
7 : .243E+00
8 : .380E+00
9 : .518E+00
10 : .655E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
8
8
9


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.615E+00
2 : -.345E+00
3 : -.747E-01
4 : .195E+00
5 : .466E+00
6 : .736E+00
7 : .101E+01
8 : .128E+01
9 : .155E+01
10 : .182E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
4
3
5
6
2


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.615E+00
2 : -.345E+00
3 : -.747E-01
4 : .195E+00
5 : .466E+00
6 : .736E+00
7 : .101E+01
8 : .128E+01
9 : .155E+01
10 : .182E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
4
5
6
7
9

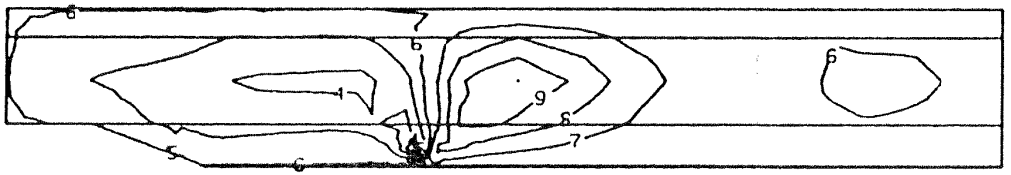
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

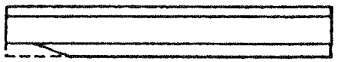
CISAILLEMENT SXY

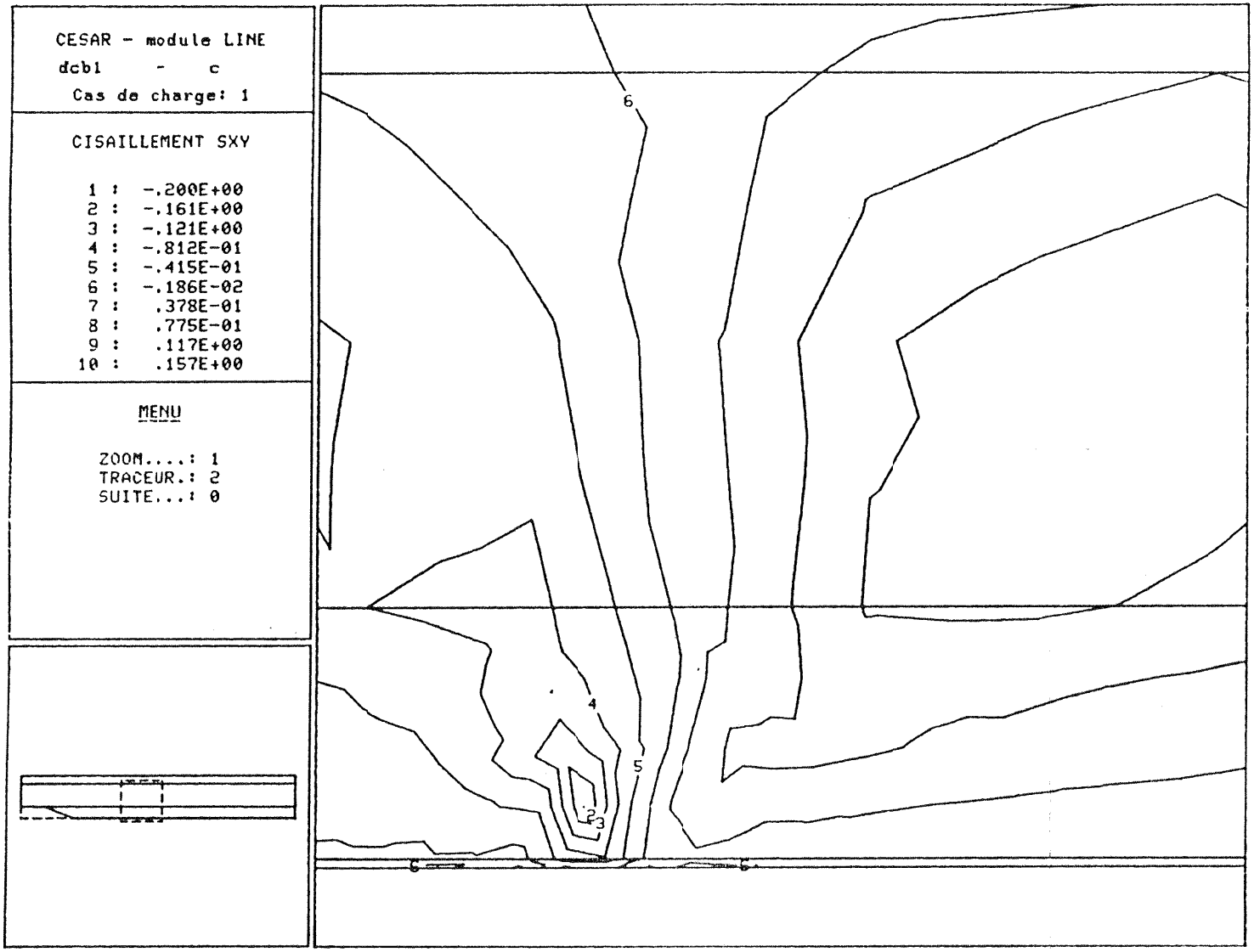
1 :	-.200E+00
2 :	-.161E+00
3 :	-.121E+00
4 :	-.812E-01
5 :	-.415E-01
6 :	-.186E-02
7 :	.378E-01
8 :	.775E-01
9 :	.117E+00
10 :	.157E+00

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0





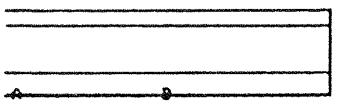

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.200E+00
2 : -.161E+00
3 : -.121E+00
4 : -.812E-01
5 : -.415E-01
6 : -.186E-02
7 : .378E-01
8 : .775E-01
9 : .117E+00
10 : .157E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
6
4
5
2
3
C
C'

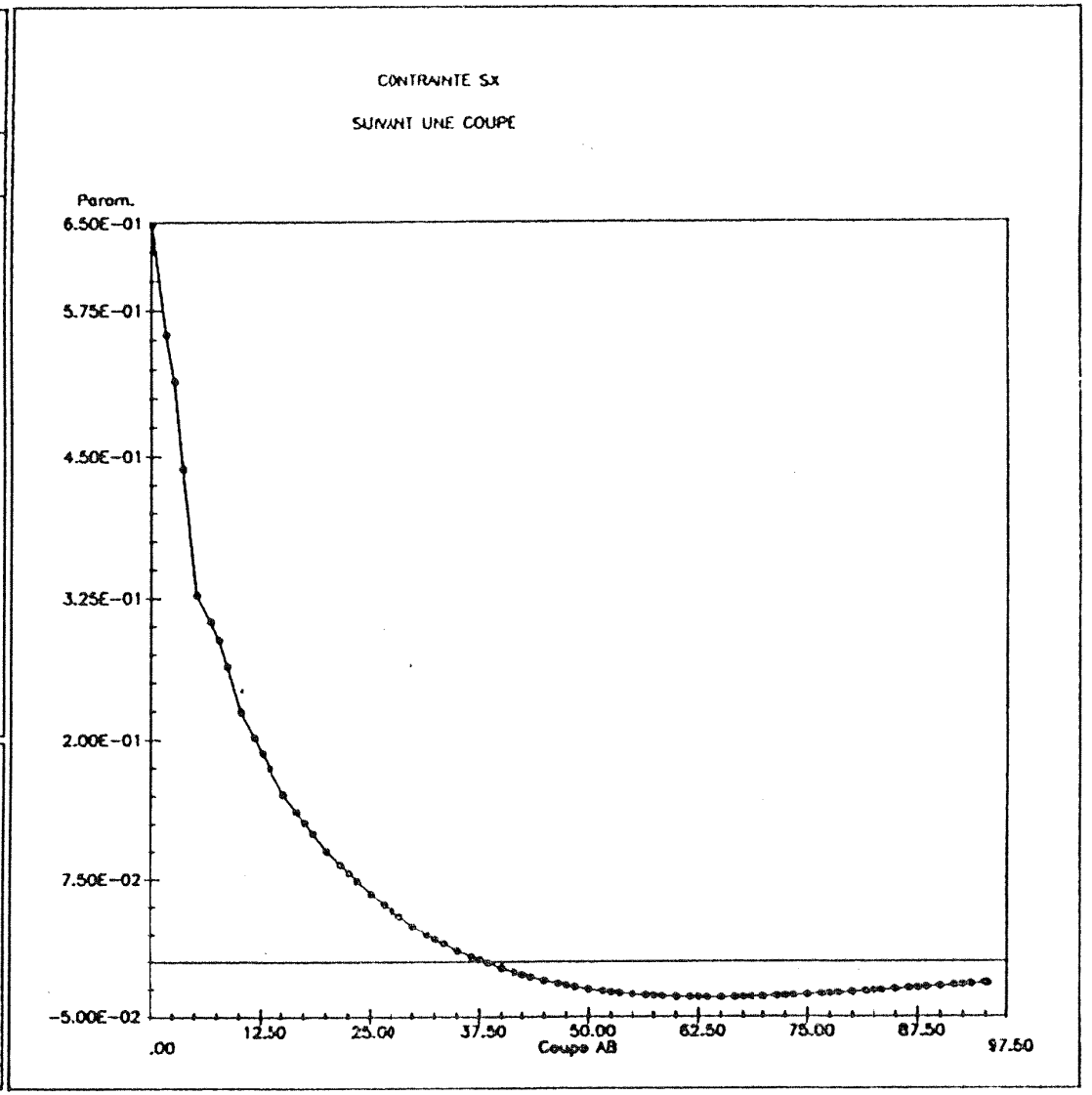
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



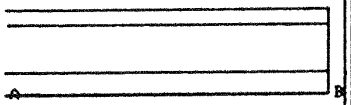


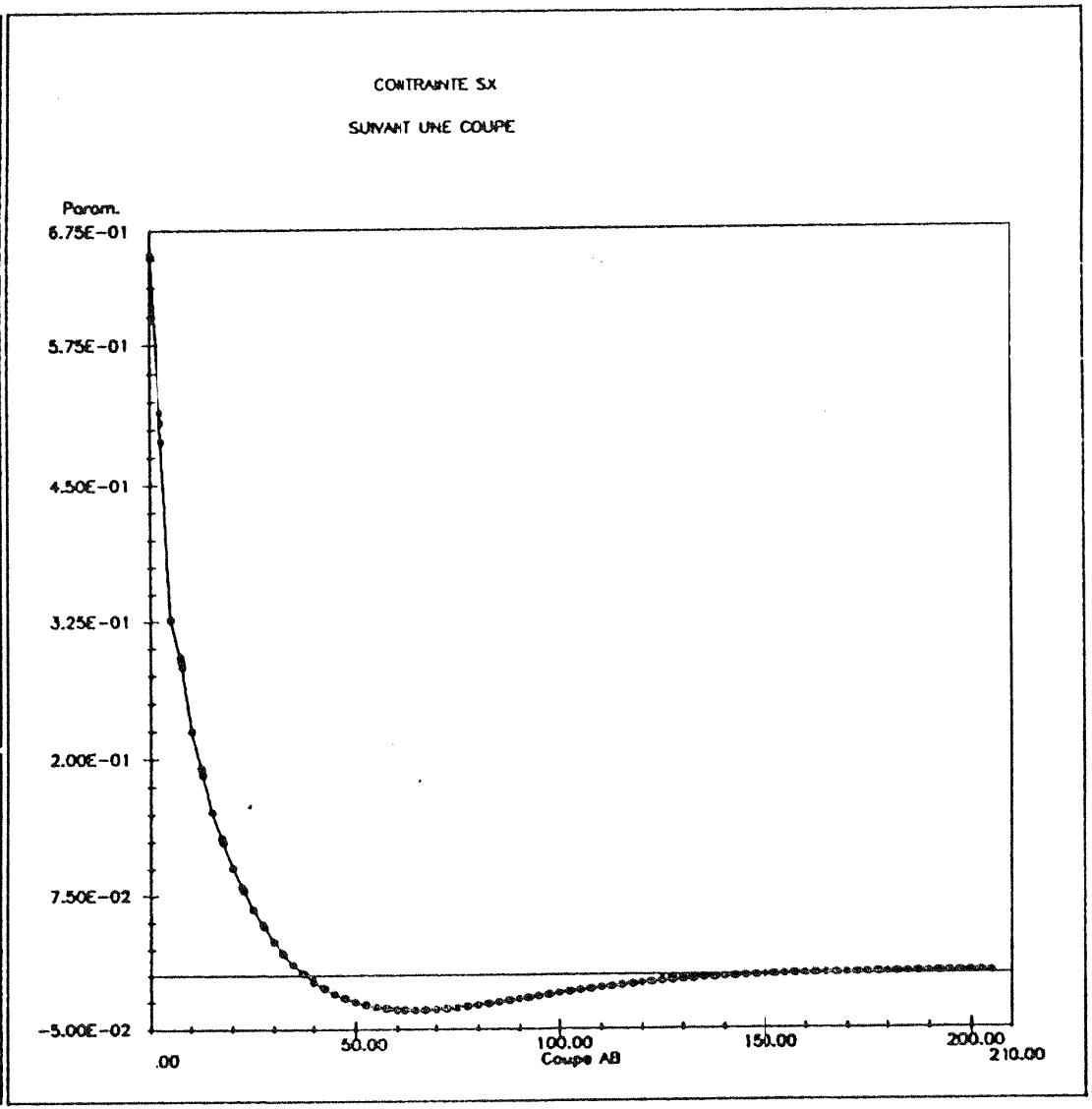
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



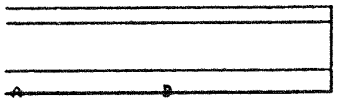


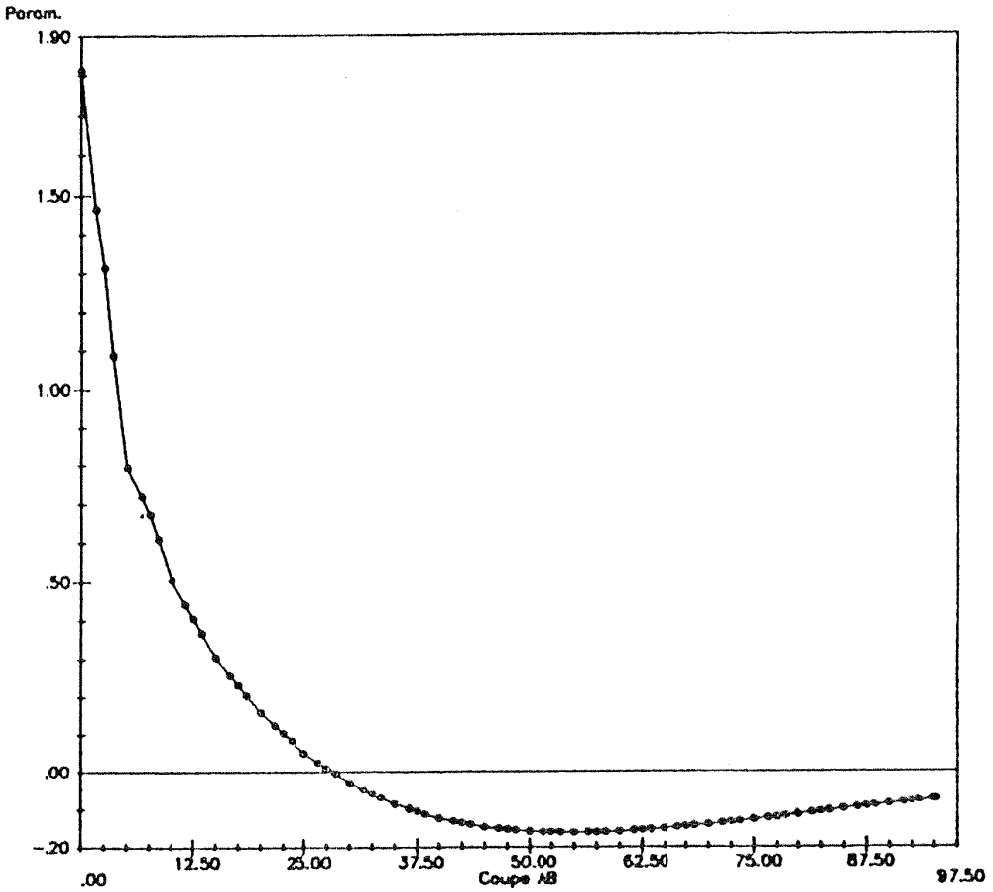
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



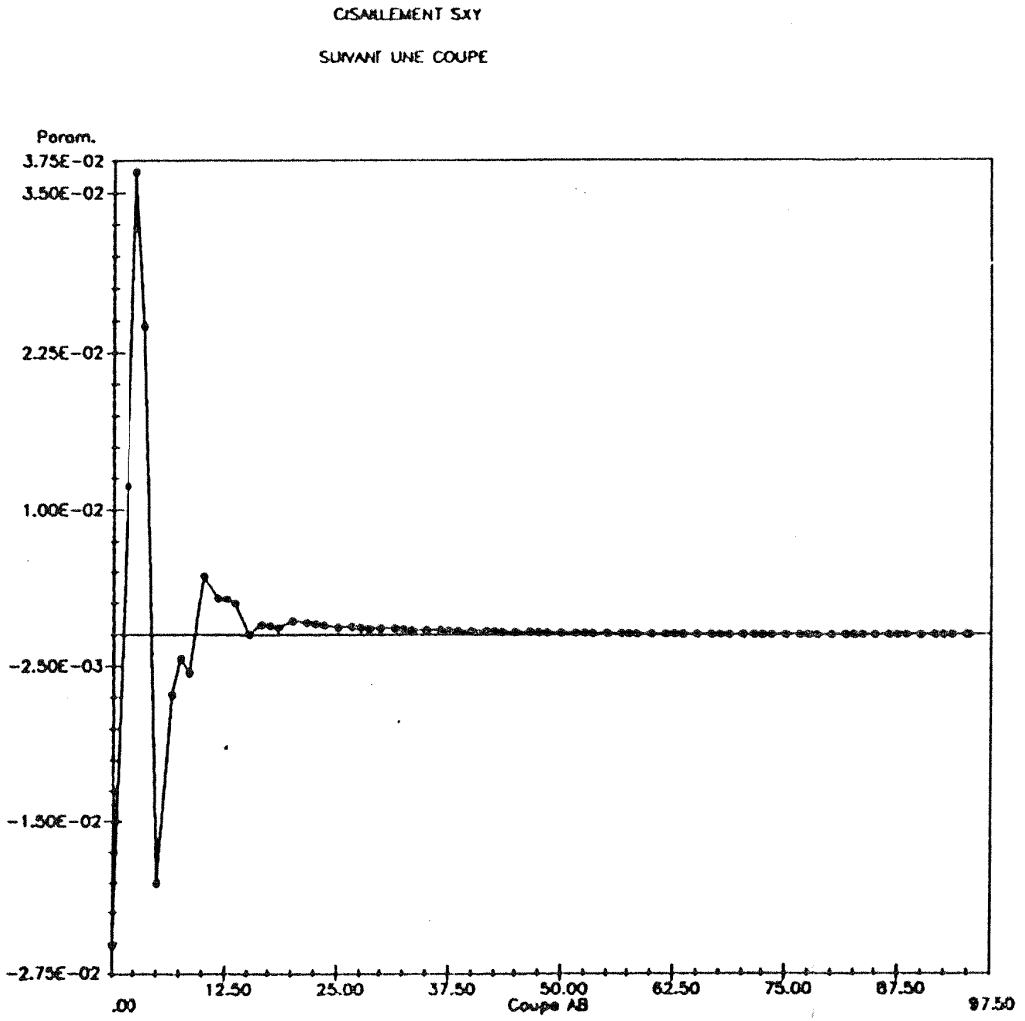


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

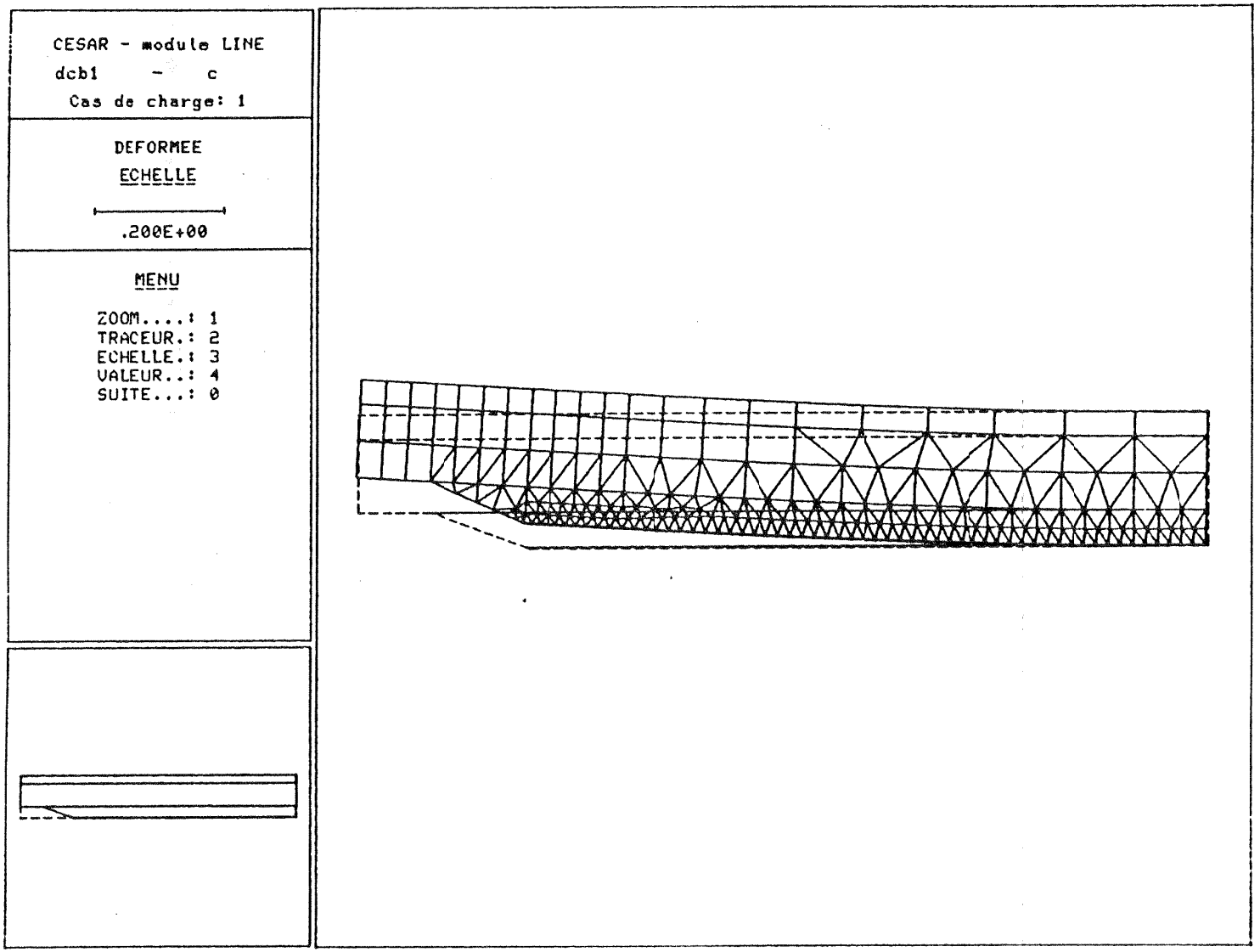
MENU

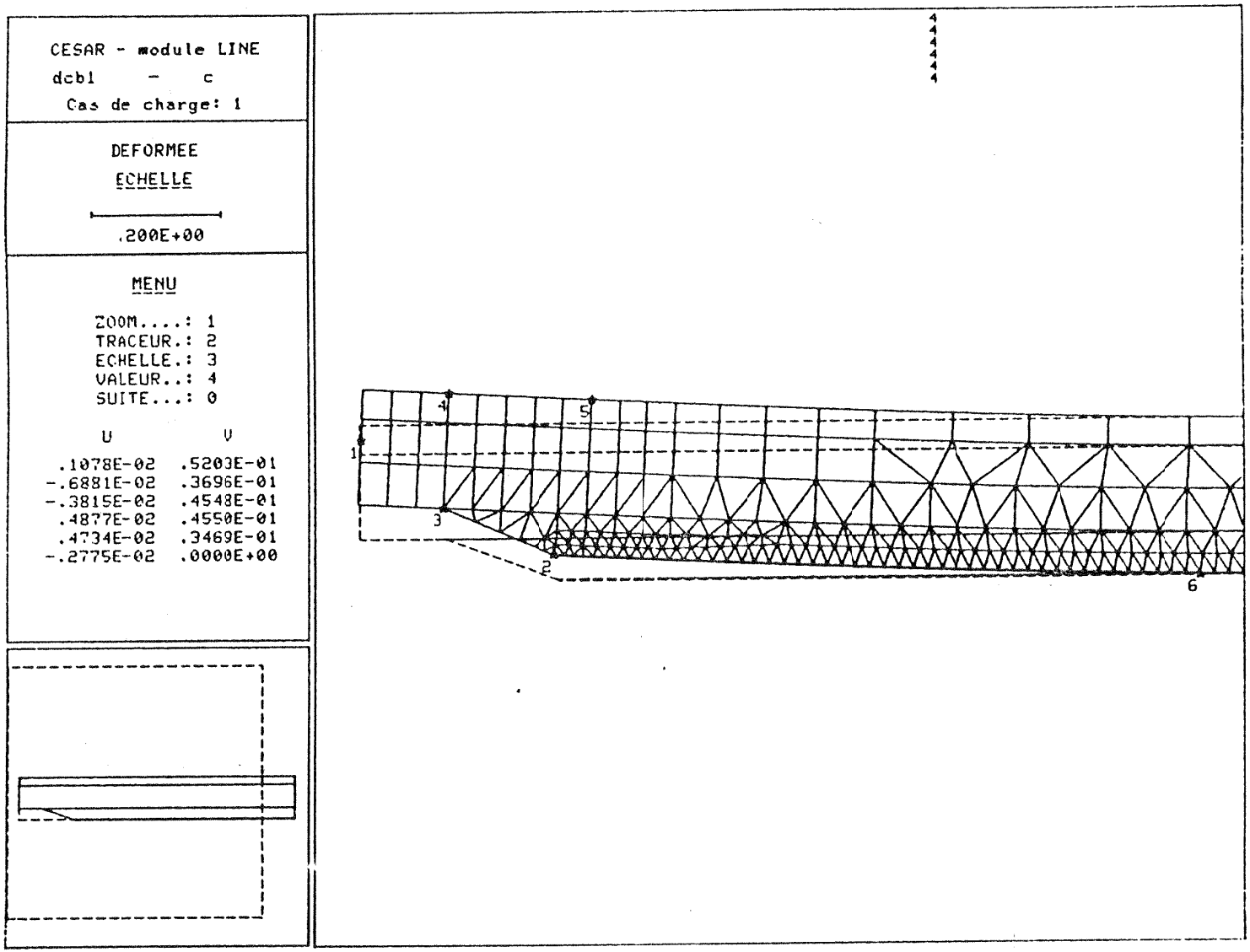
TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0

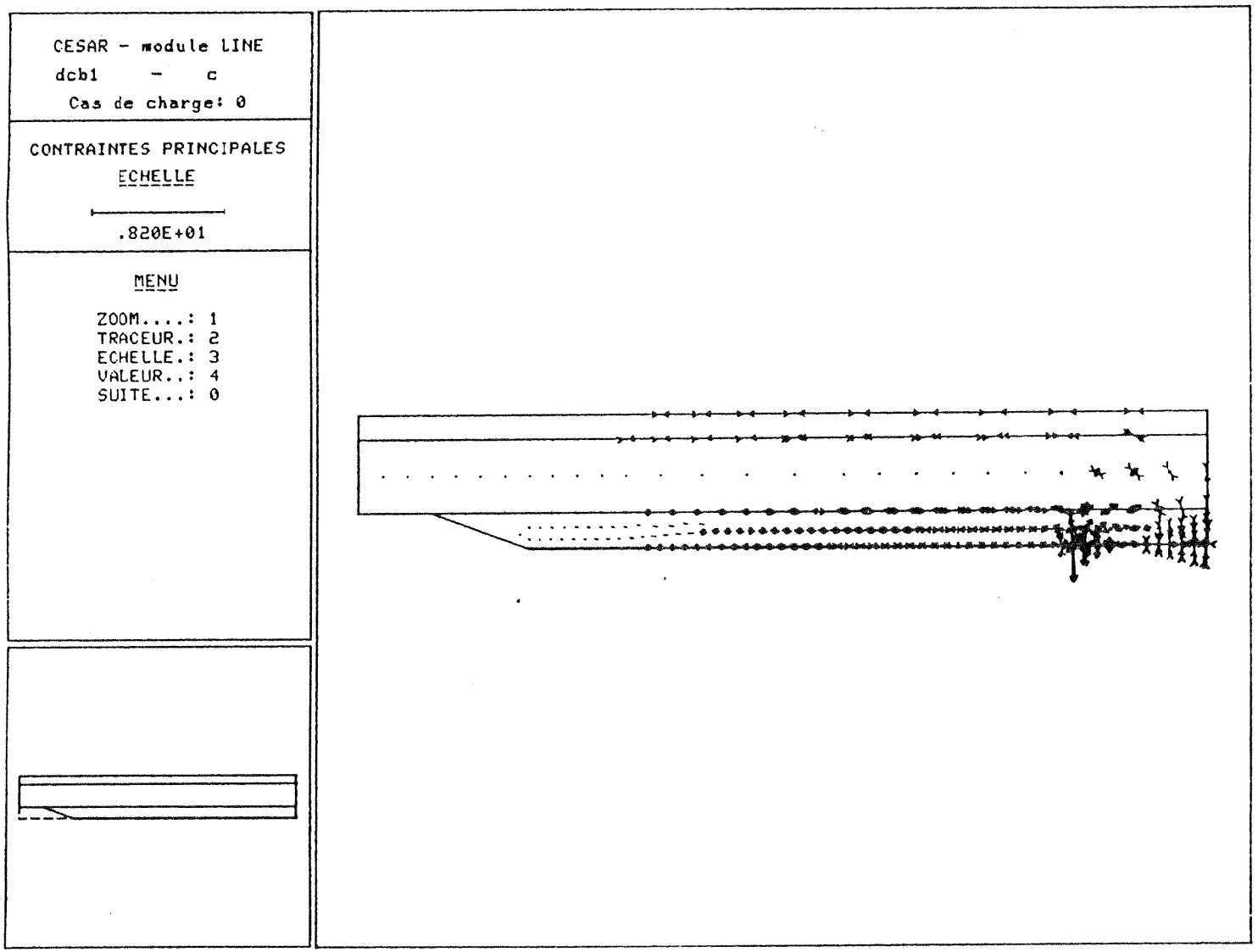


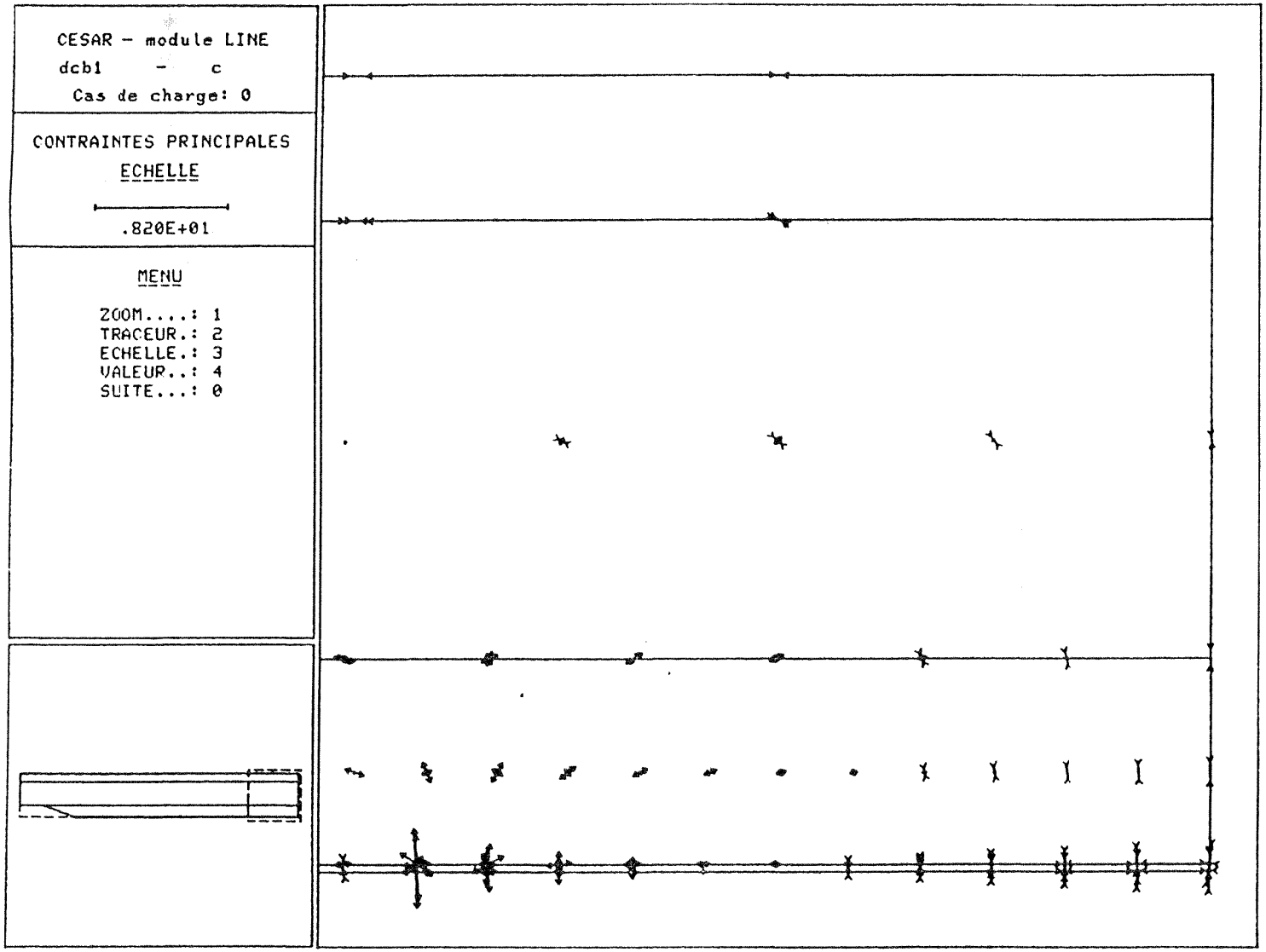
— ANEXO 3.6 —

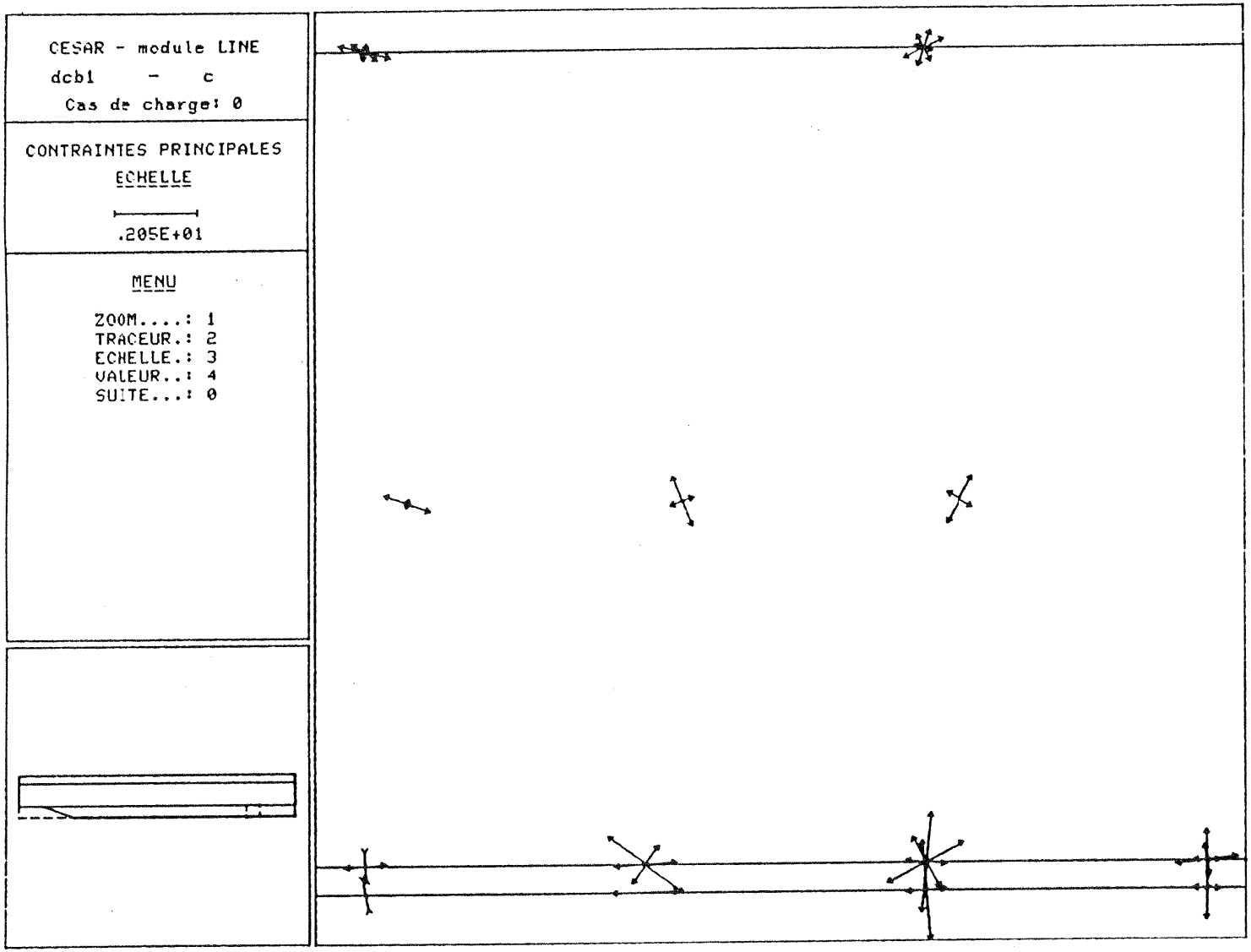
— ARGAMASSA + COLA $a = 25,5\,cm$ —


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.200E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.200E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0
U V
.1078E-02 .5203E-01
-.6881E-02 .3696E-01
-.3815E-02 .4548E-01
.4877E-02 .4550E-01
.4734E-02 .3469E-01
-.2775E-02 .0000E+00
1
2
3
4
5
6


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.820E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.820E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.205E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

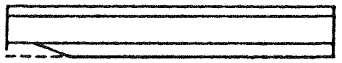
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

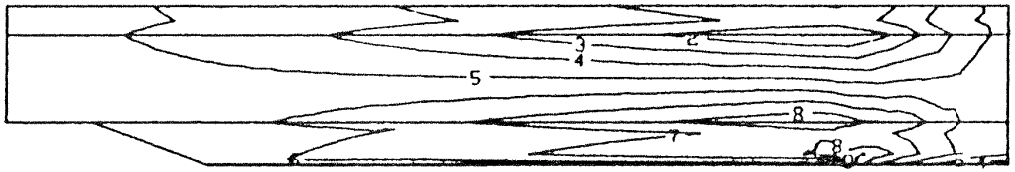
CONTRAINTE SX

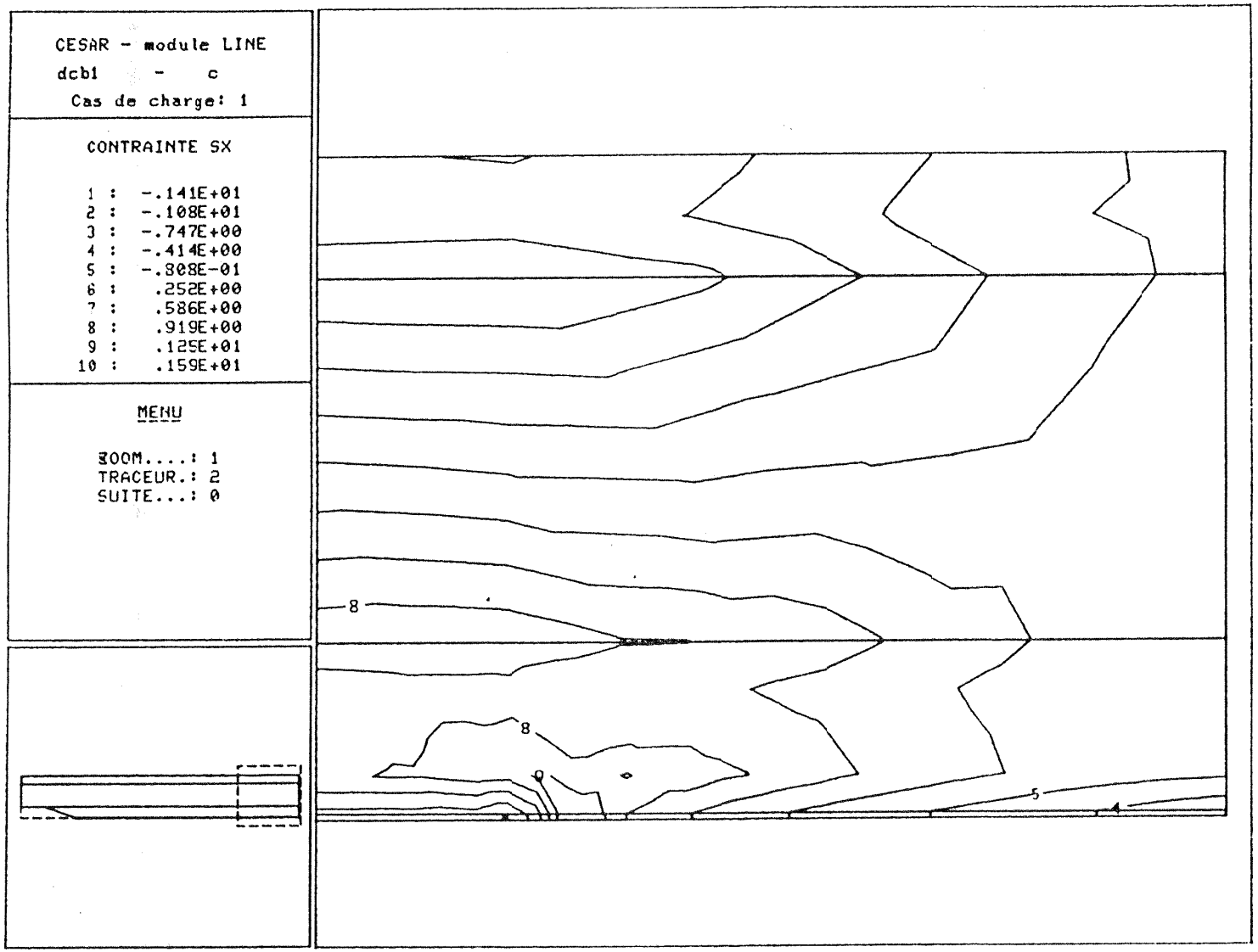
1	:	-.141E+01
2	:	-.108E+01
3	:	-.747E+00
4	:	-.414E+00
5	:	-.808E-01
6	:	.252E+00
7	:	.586E+00
8	:	.919E+00
9	:	.125E+01
10	:	.159E+01

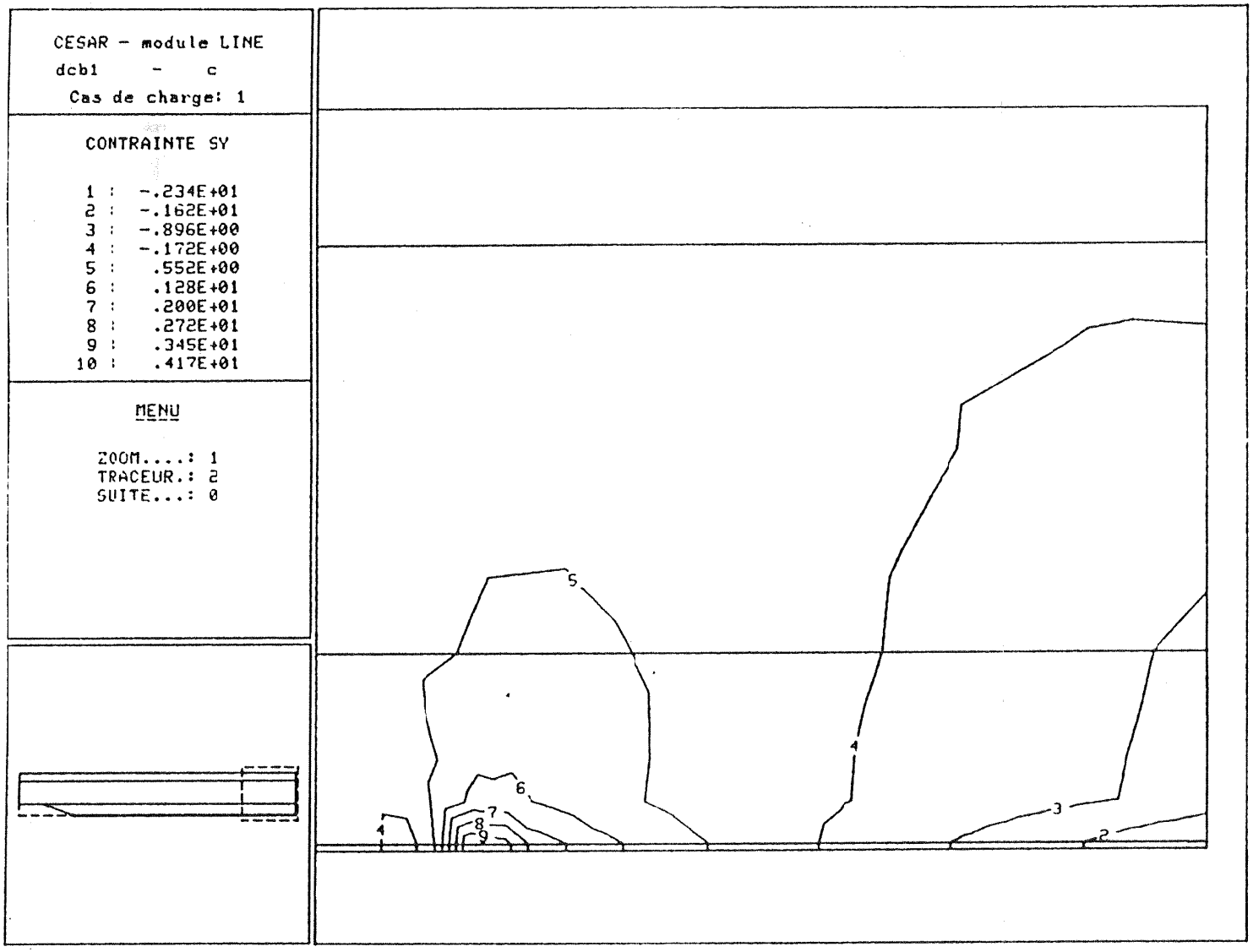
MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0






CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.141E+01
2 : -.108E+01
3 : -.747E+00
4 : -.414E+00
5 : -.808E-01
6 : .252E+00
7 : .586E+00
8 : .919E+00
9 : .125E+01
10 : .159E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
8
8
9
5
4


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.234E+01
2 : -.162E+01
3 : -.896E+00
4 : -.172E+00
5 : .552E+00
6 : .128E+01
7 : .200E+01
8 : .272E+01
9 : .345E+01
10 : .417E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
5
4
6
7
8
9
3
2
1

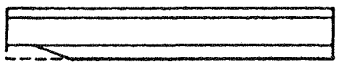
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

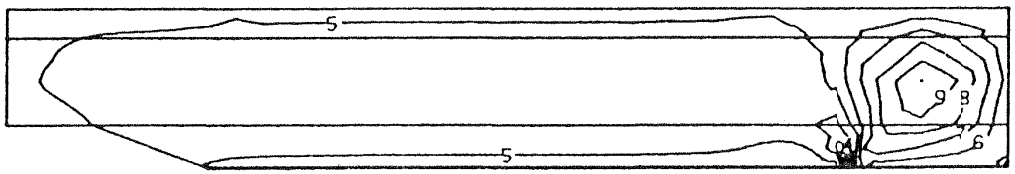
CISAILLEMENT SXY

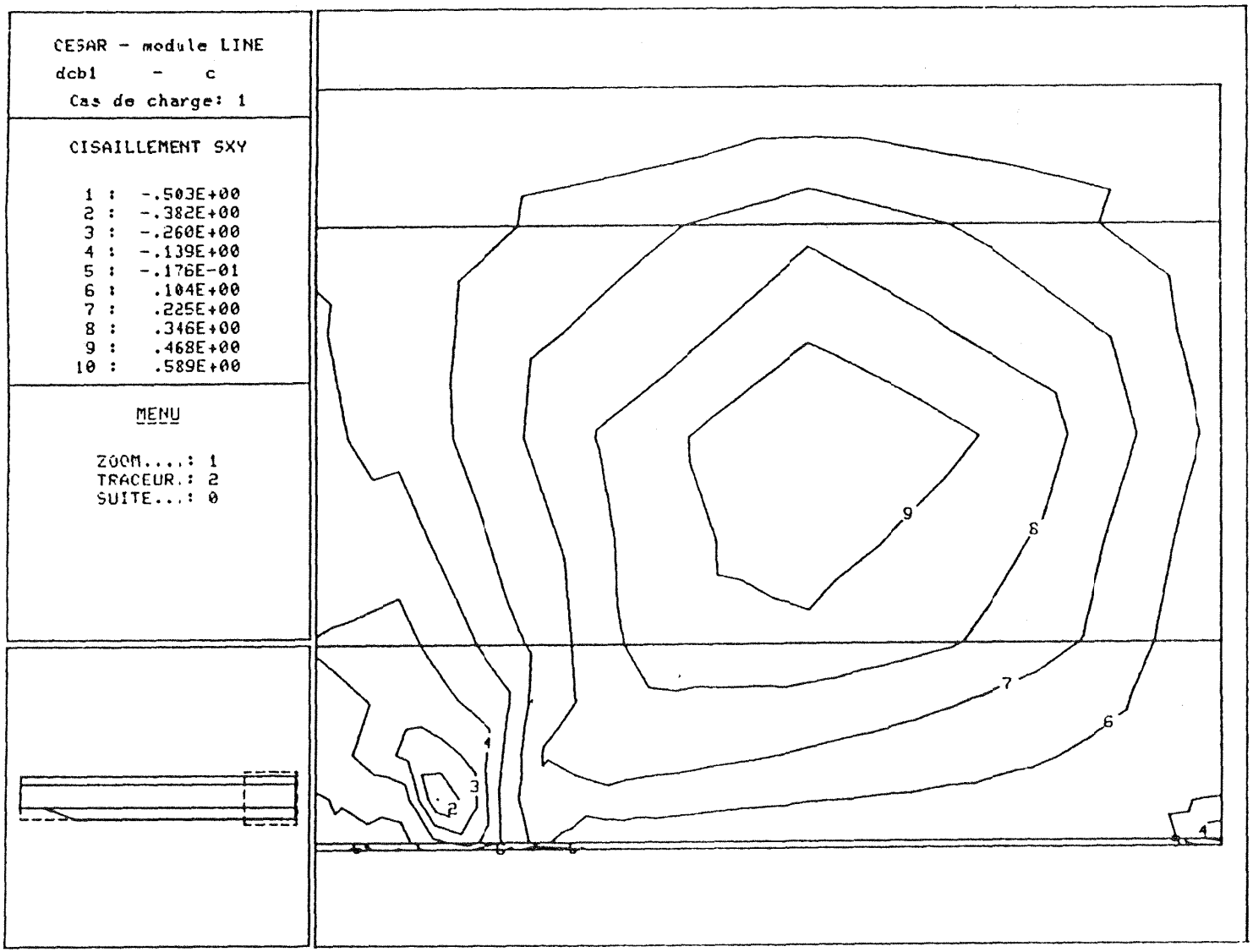
1	:	-.503E+00
2	:	-.382E+00
3	:	-.260E+00
4	:	-.139E+00
5	:	-.176E-01
6	:	.104E+00
7	:	.225E+00
8	:	.346E+00
9	:	.468E+00
10	:	.589E+00

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0





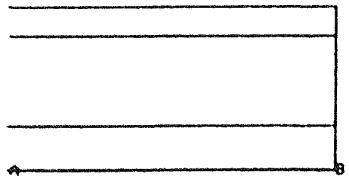

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.503E+00
2 : -.382E+00
3 : -.260E+00
4 : -.139E+00
5 : -.176E-01
6 : .104E+00
7 : .225E+00
8 : .346E+00
9 : .468E+00
10 : .589E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
9
8
7
6
4
3
2

CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

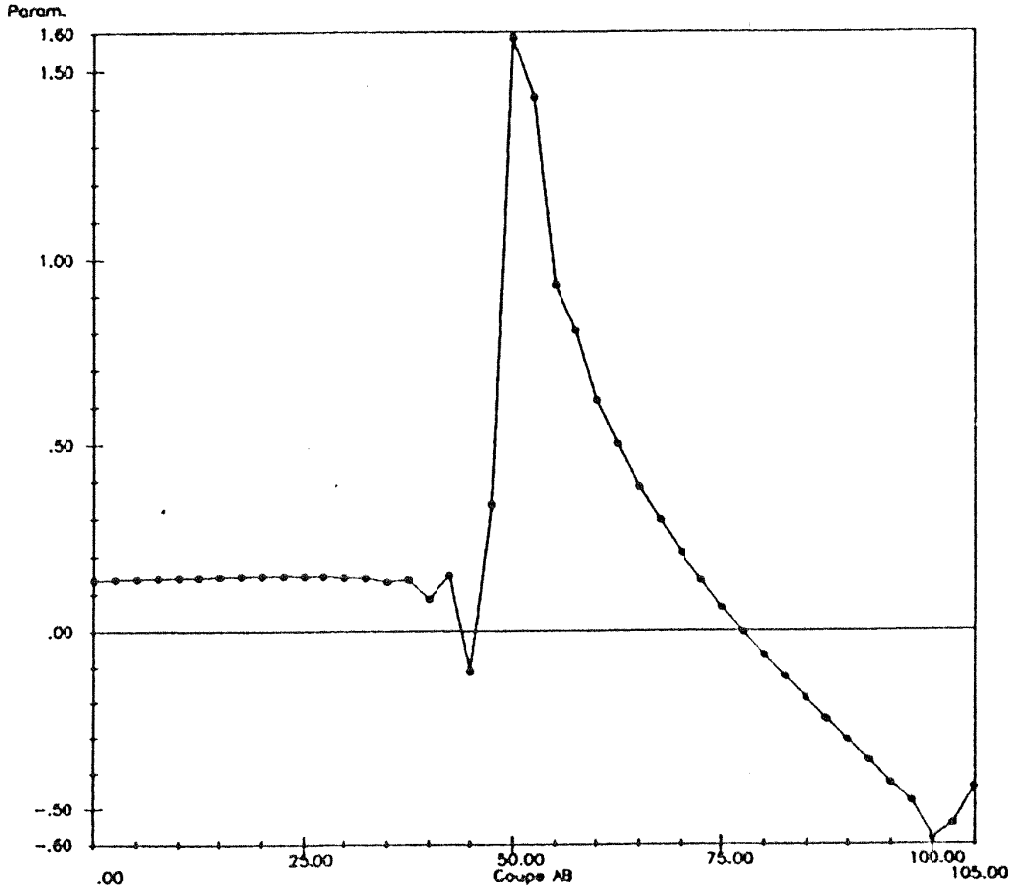
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE SX

SUIVANT UNE COUPE

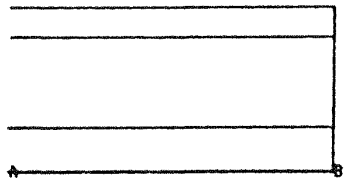


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

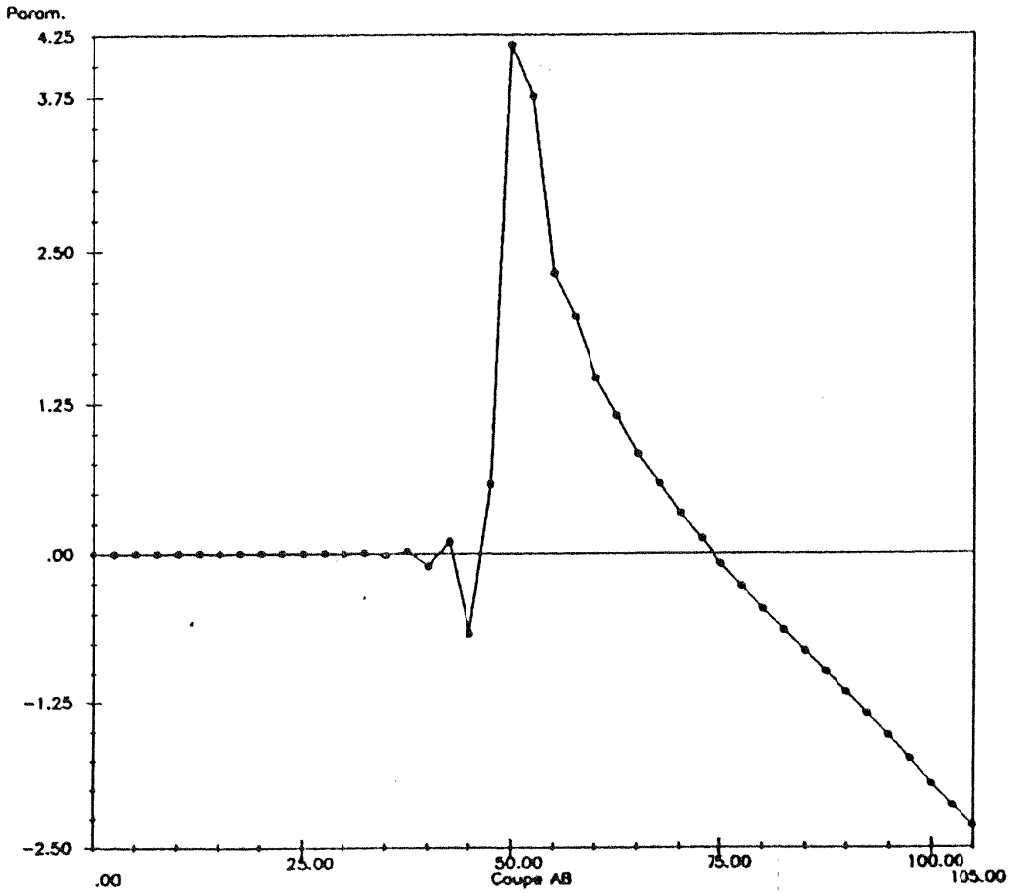
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE SY

SUIVANT UNE COUPE

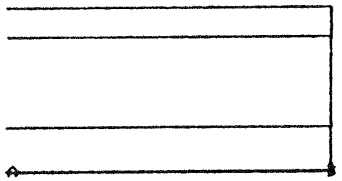


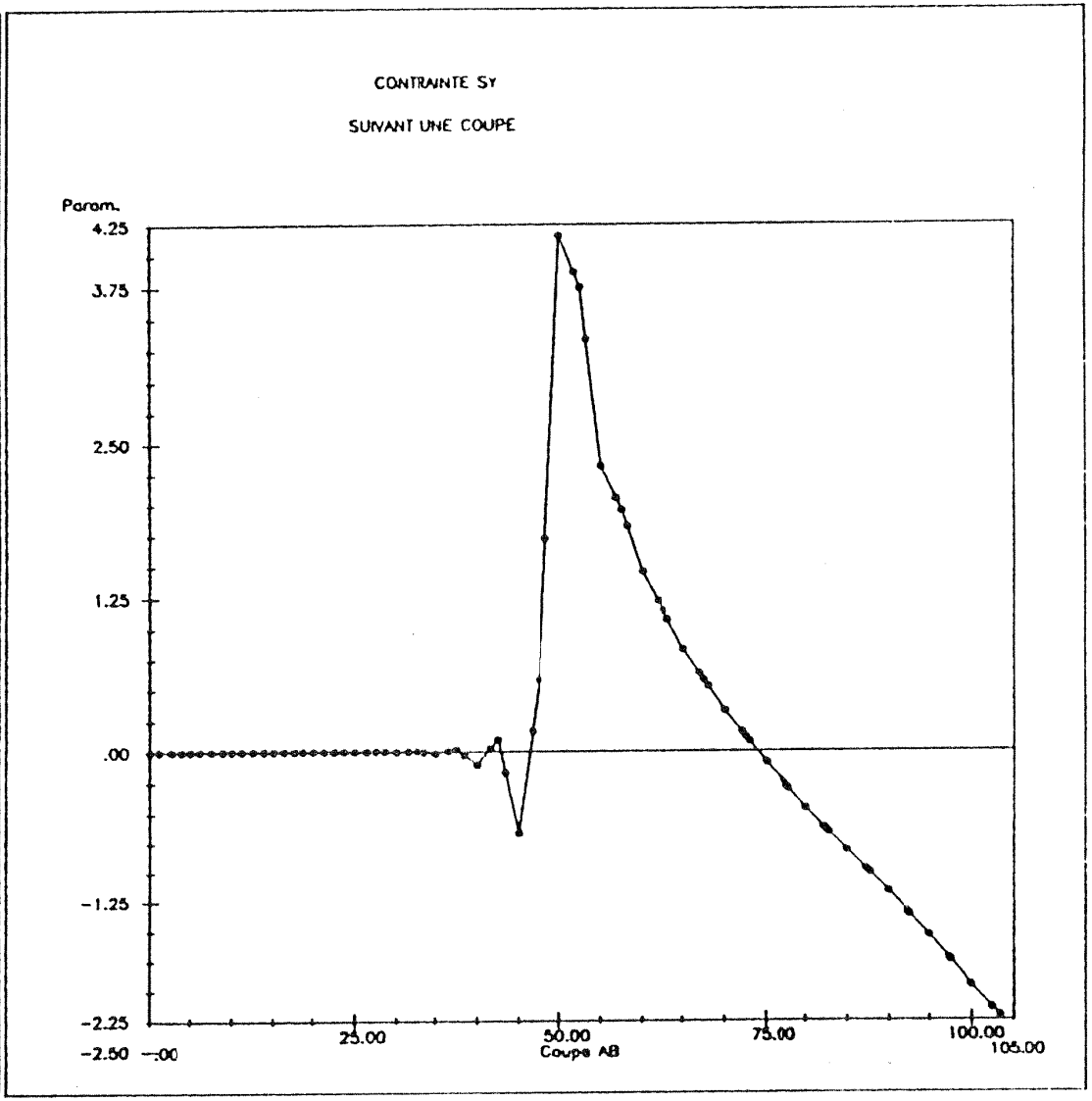
CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



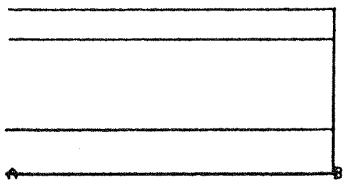


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

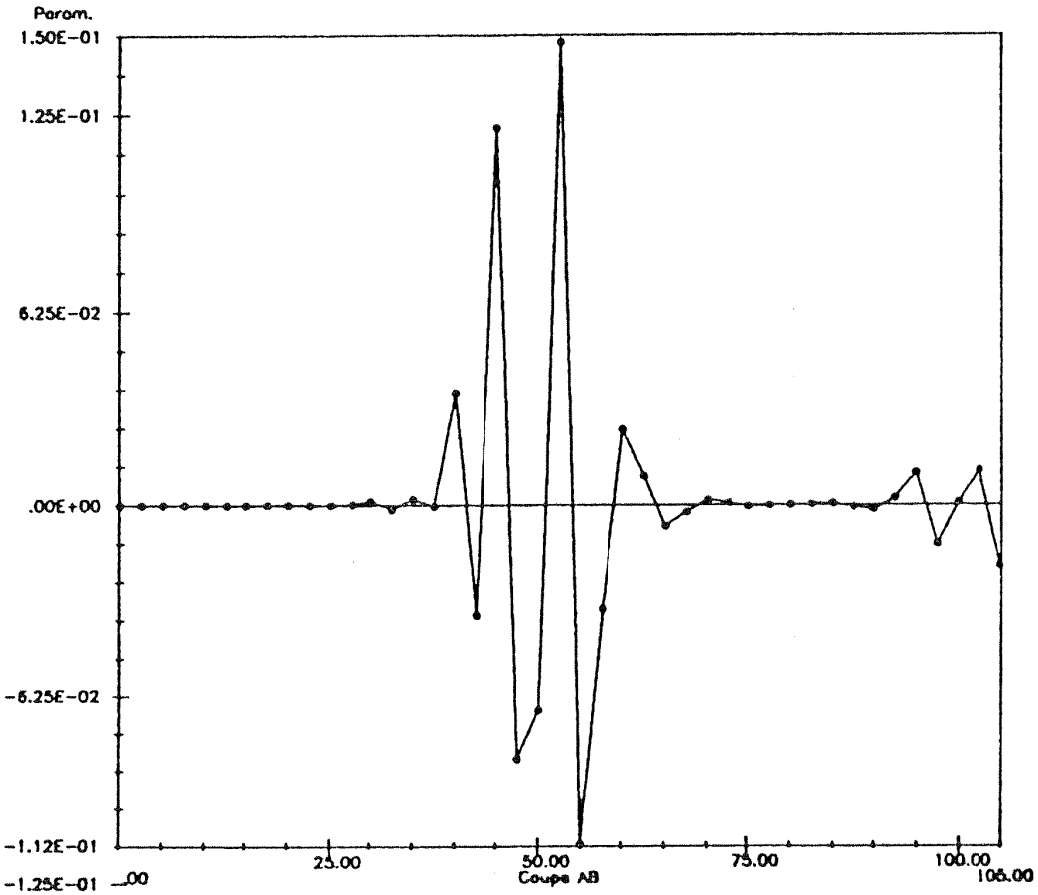
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CISAILLEMENT Sxy

SUIVANT UNE COUPE

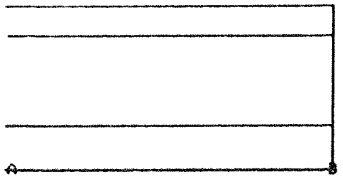


CESAR - module LINE
dcb1 - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

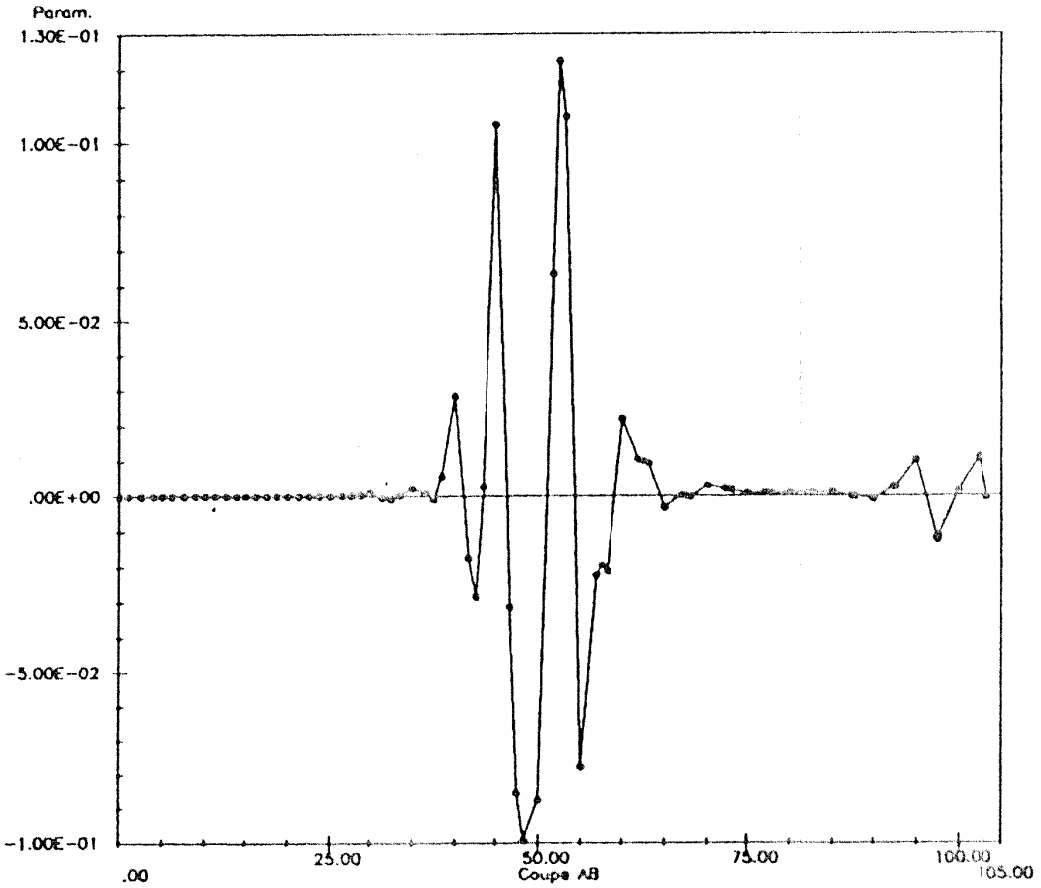
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



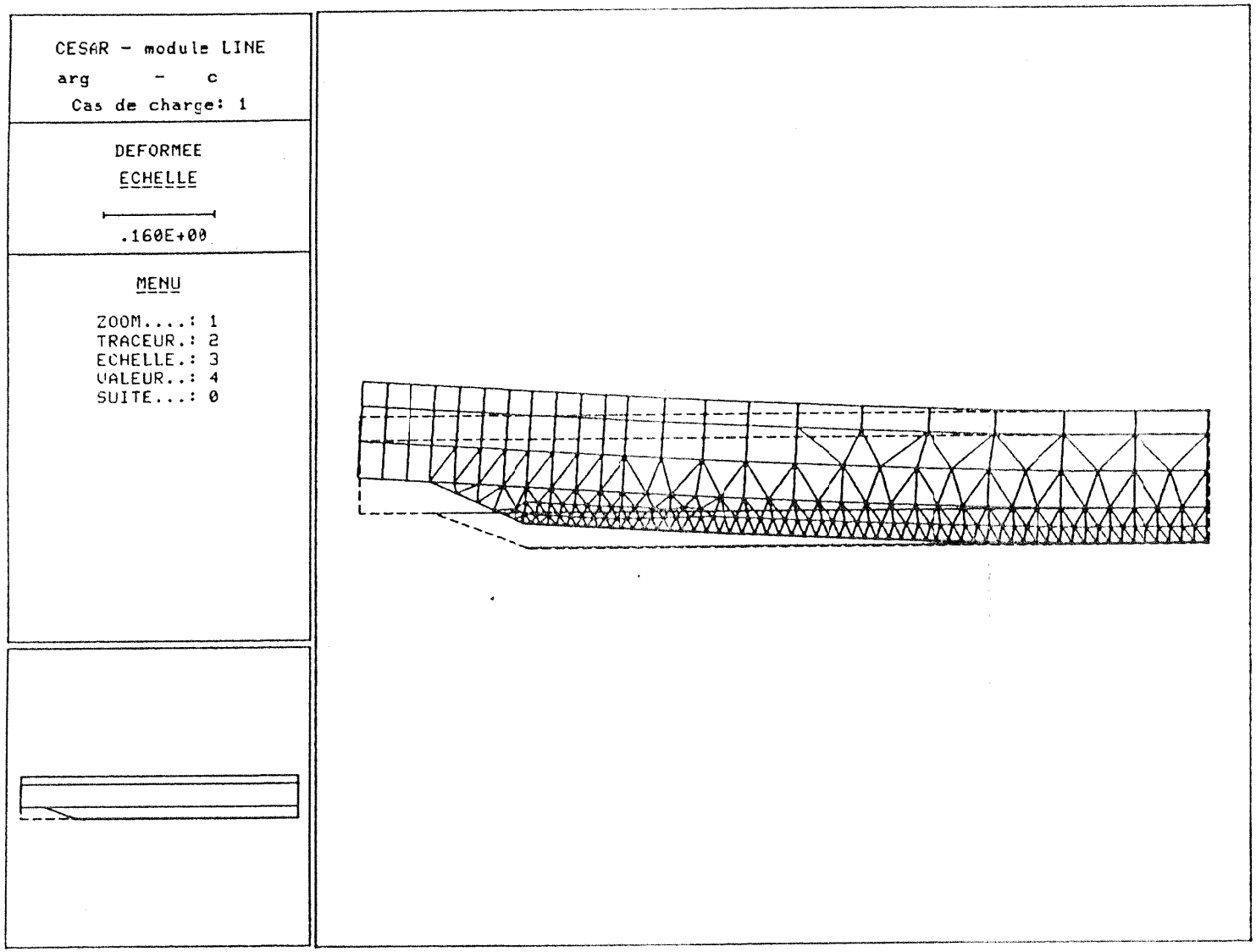
CISAILLEMENT SXY

SUIVANT UNE COUPE



— ANEXO 3.7 —

— ARGAMASSA $a = 25{,}5\,cm$ —


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.160E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

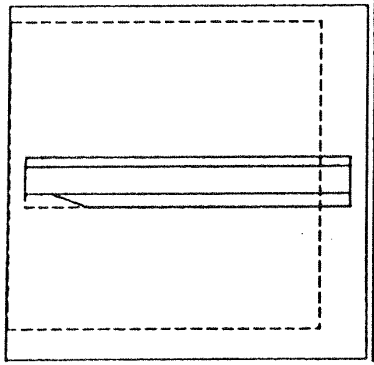
DEFORMEE
ECHELLE

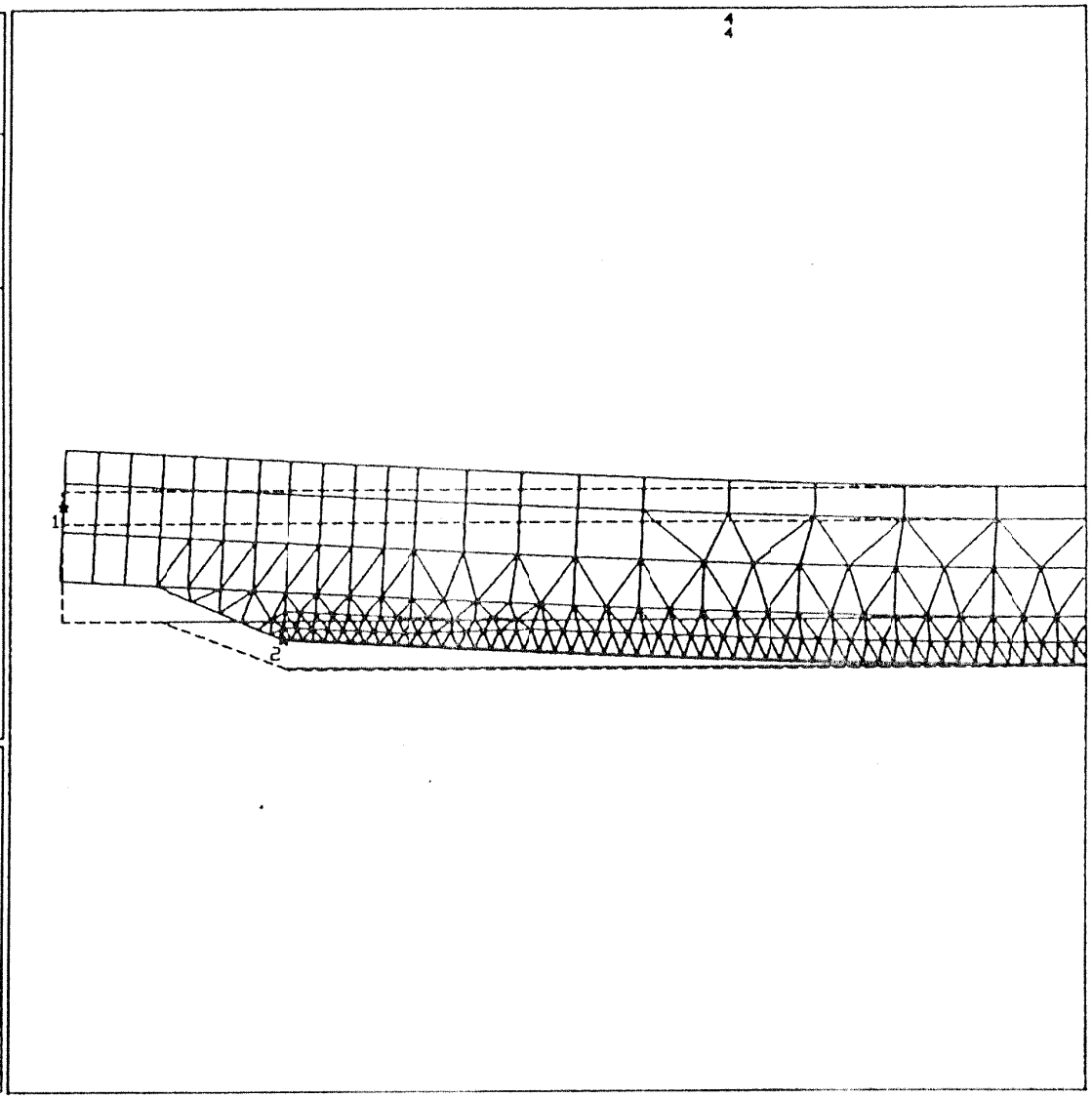
.160E+00

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

U	V
.1220E-02	.4841E-01
-.6350E-02	.3403E-01





CESAR - module LINE

arg - c

Cas de charge: 1

DEFORMEE

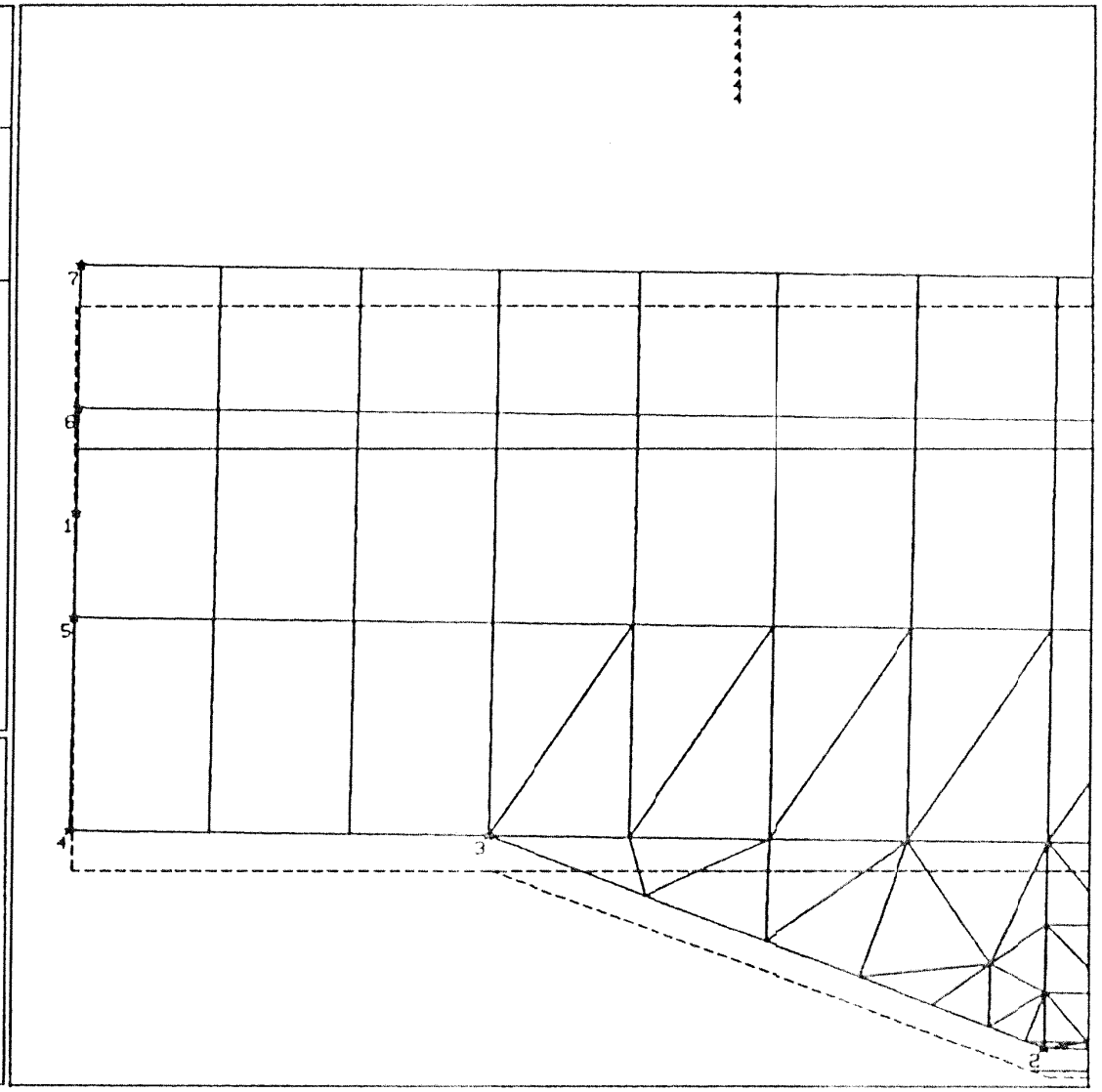
ECHELLE

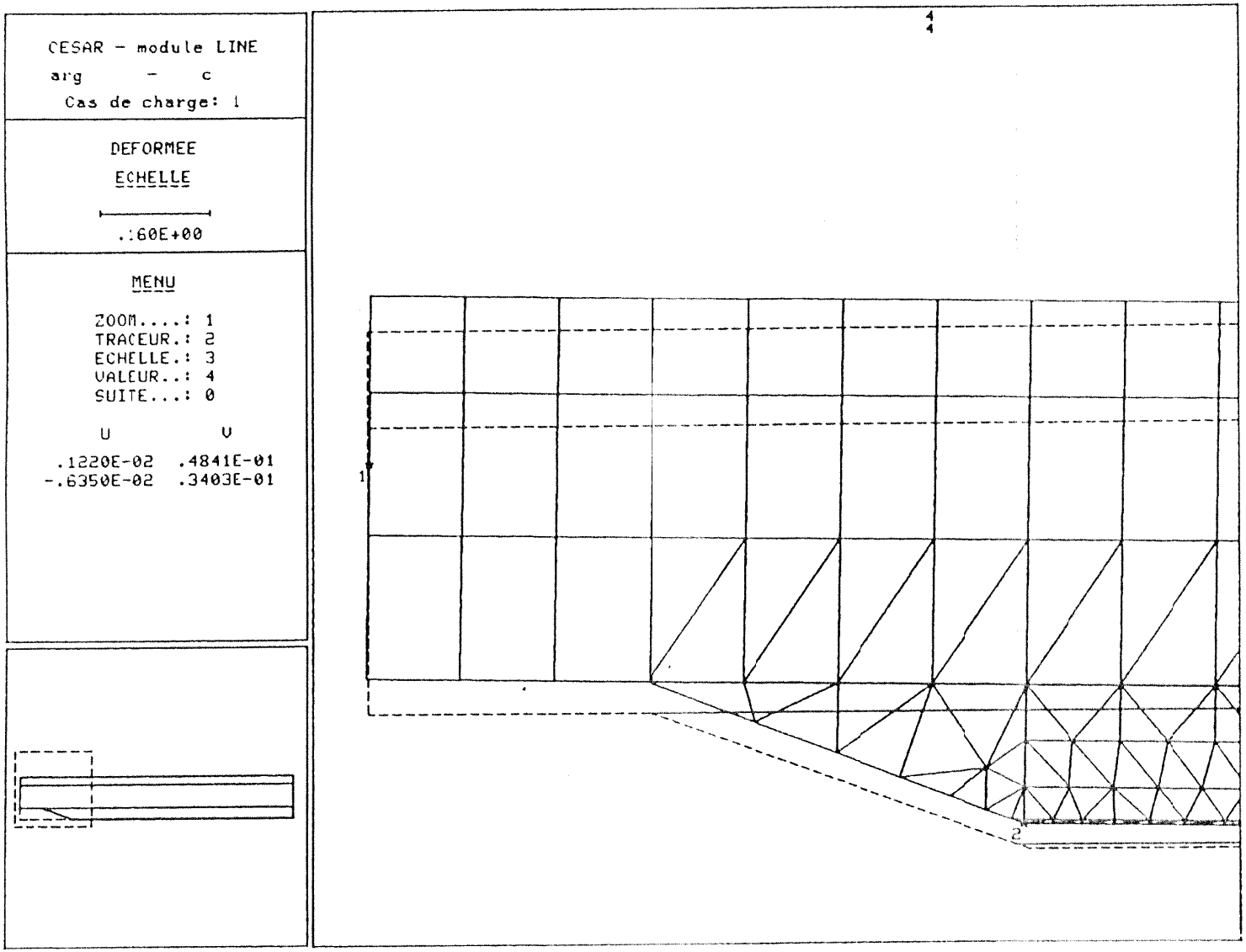
.160E+00

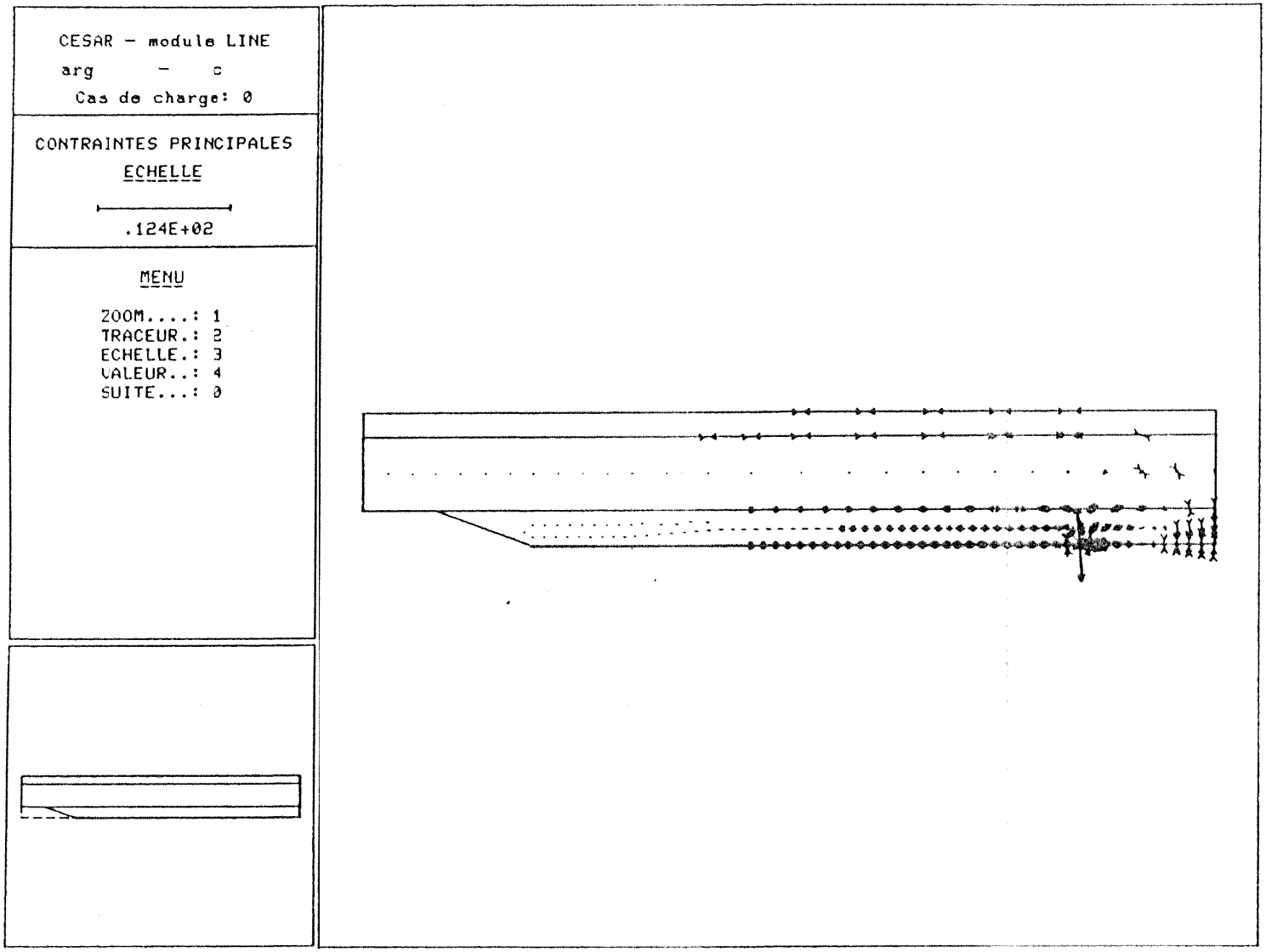
MENU

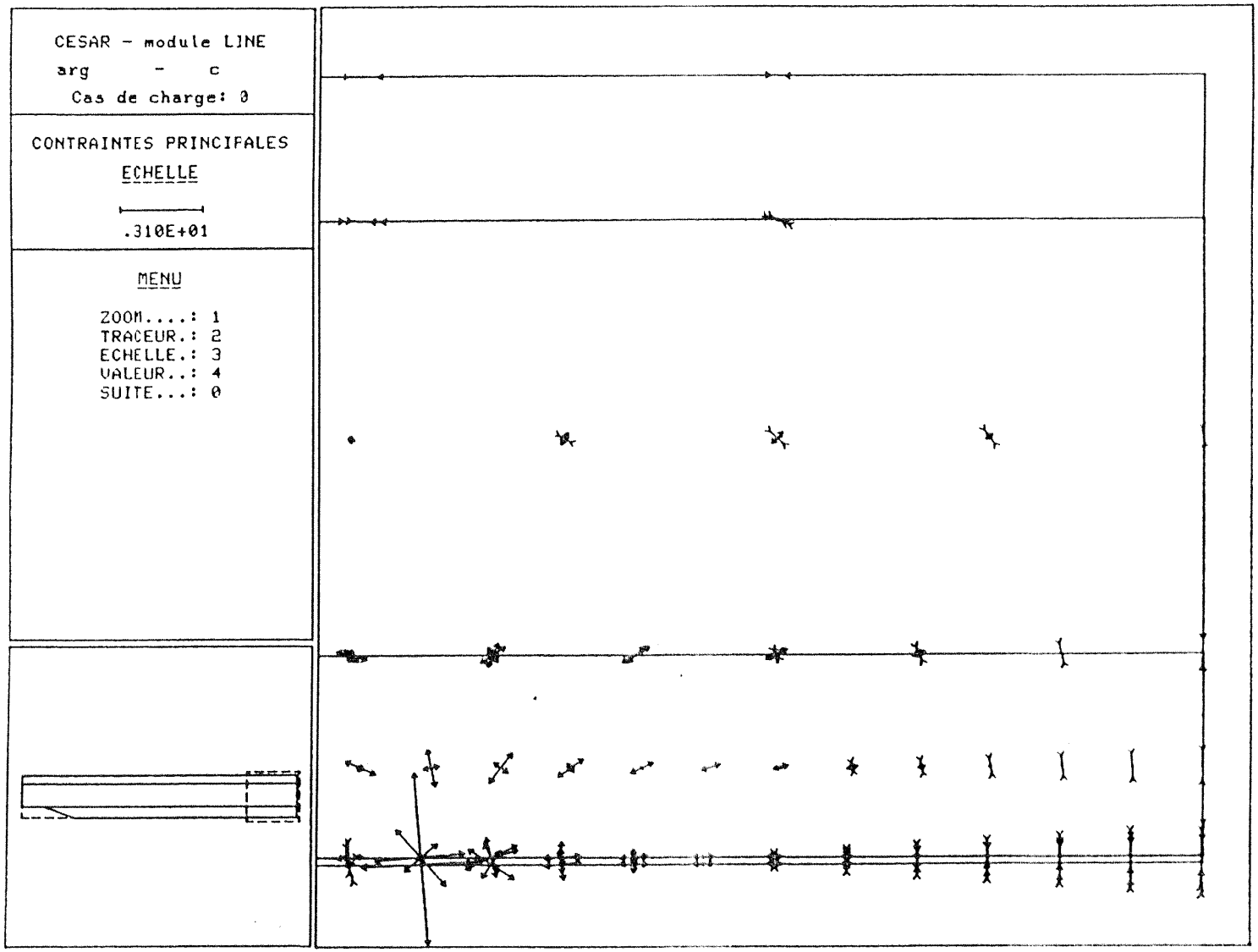
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

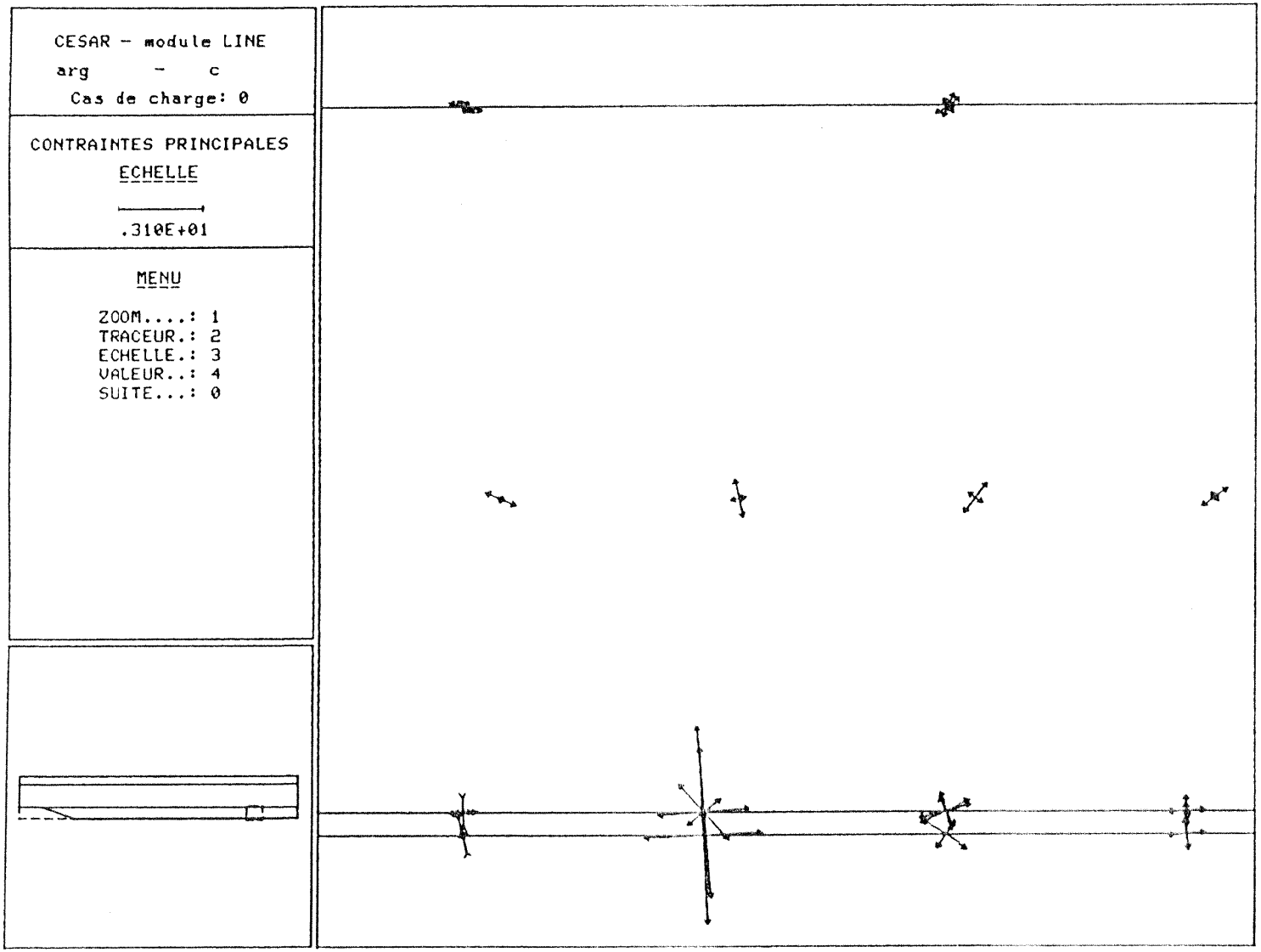
U	V
.1220E-02	.4841E-01
-.6350E-02	.3403E-01
-.3409E-02	.4222E-01
-.3417E-02	.4841E-01
-.3250E-03	.4841E-01
.2766E-02	.4842E-01
.4828E-02	.4843E-01




CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
DEFORMEE
ECHELLE
.160E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0
U V
.1220E-02 .4841E-01
-.6350E-02 .3403E-01
1
2


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.124E+02
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.310E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 0
CONTRAINTES PRINCIPALES
ECHELLE
.310E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
ECHELLE.: 3
VALEUR..: 4
SUITE...: 0

CESAR - module LINE

arg - c

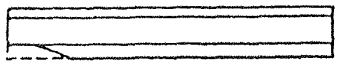
Cas de charge: 1

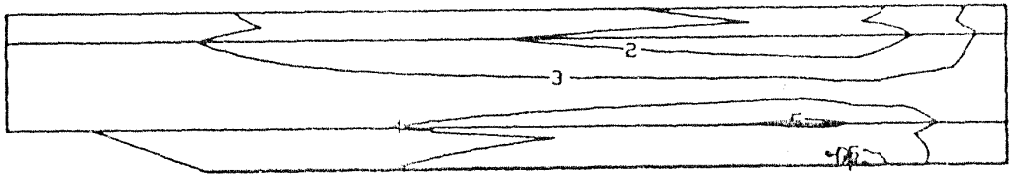
CONTRAINTE SX

1 :	-.140E+01
2 :	-.785E+00
3 :	-.175E+00
4 :	.435E+00
5 :	.105E+01
6 :	.166E+01
7 :	.227E+01
8 :	.288E+01
9 :	.349E+01
10 :	.410E+01

MENU

ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0





CESAR - module LINE

arg - c

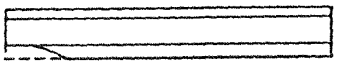
Cas de charge: 1

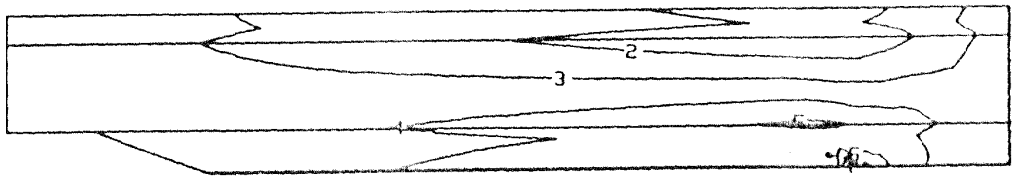
CONTRAINTE SX

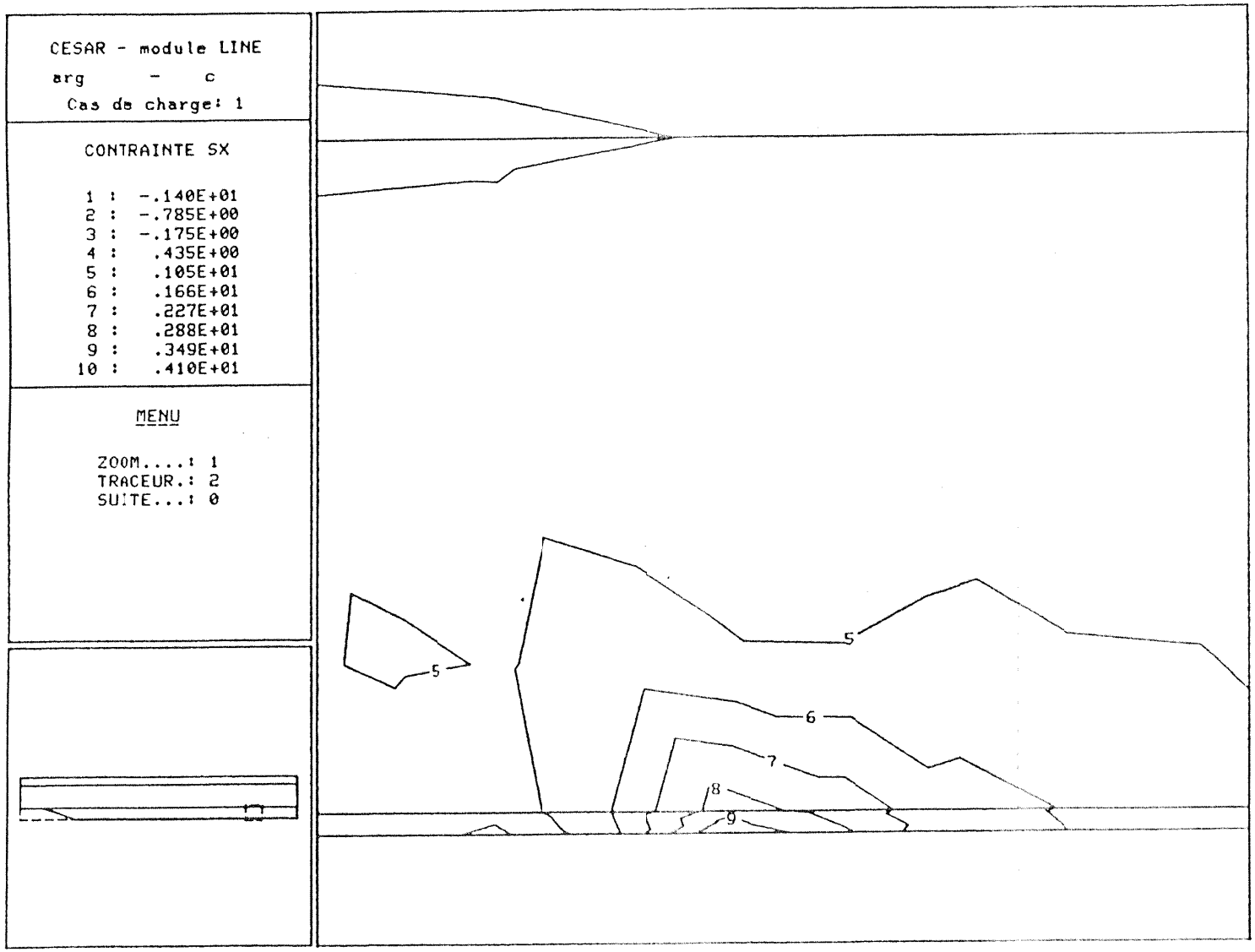
1 :	-.140E+01
2 :	-.785E+00
3 :	-.175E+00
4 :	.435E+00
5 :	.105E+01
6 :	.166E+01
7 :	.227E+01
8 :	.288E+01
9 :	.349E+01
10 :	.410E+01

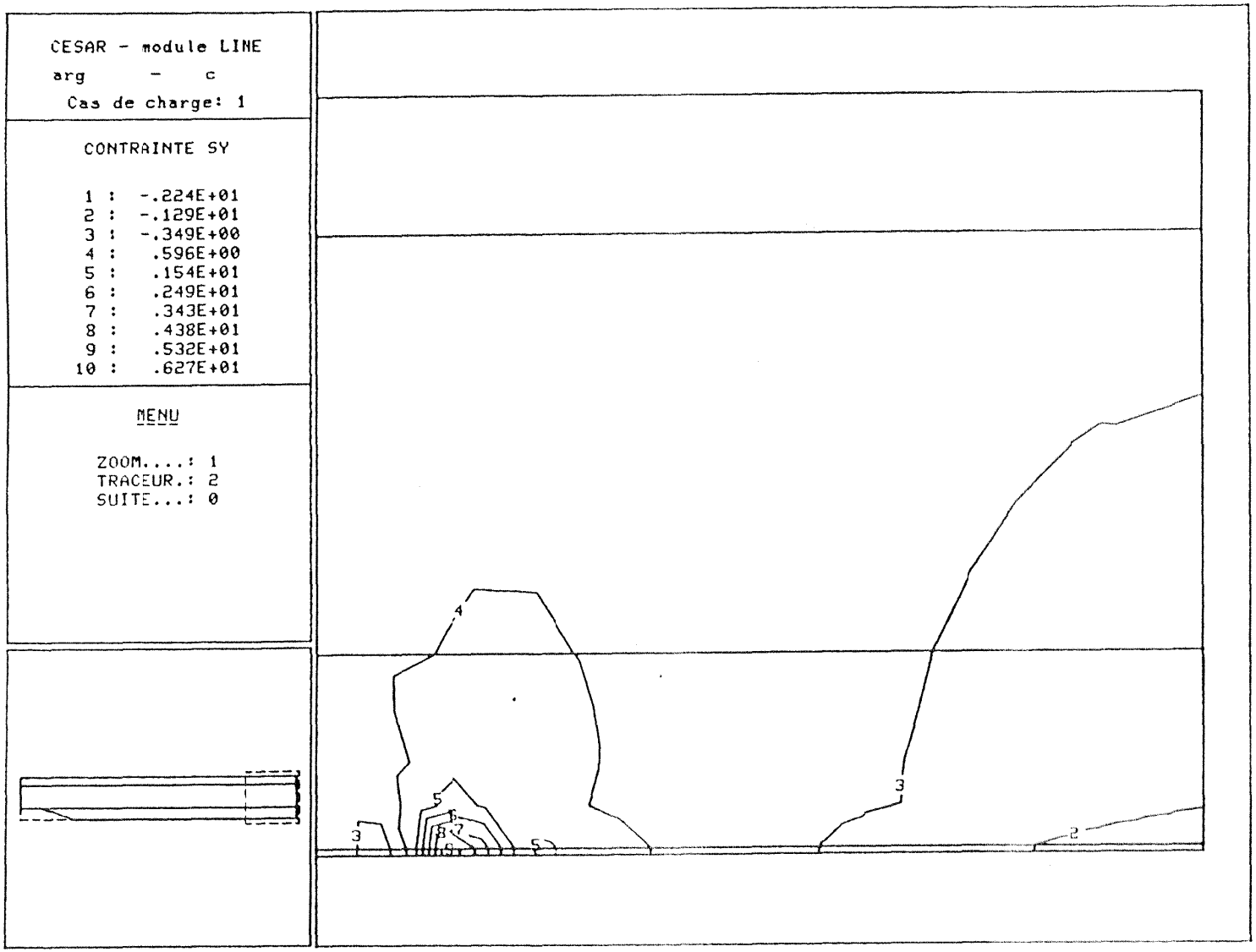
MENU

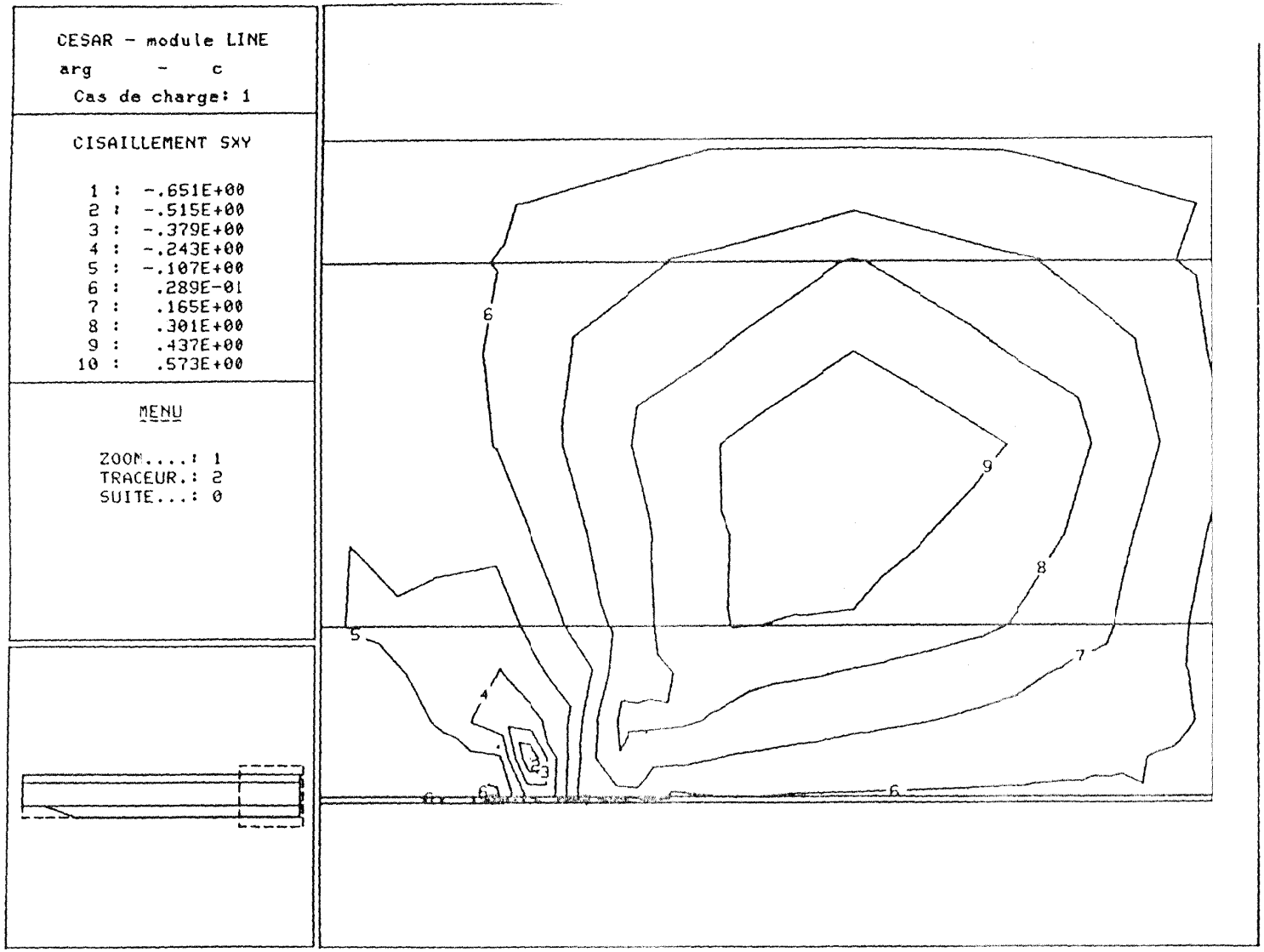
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0

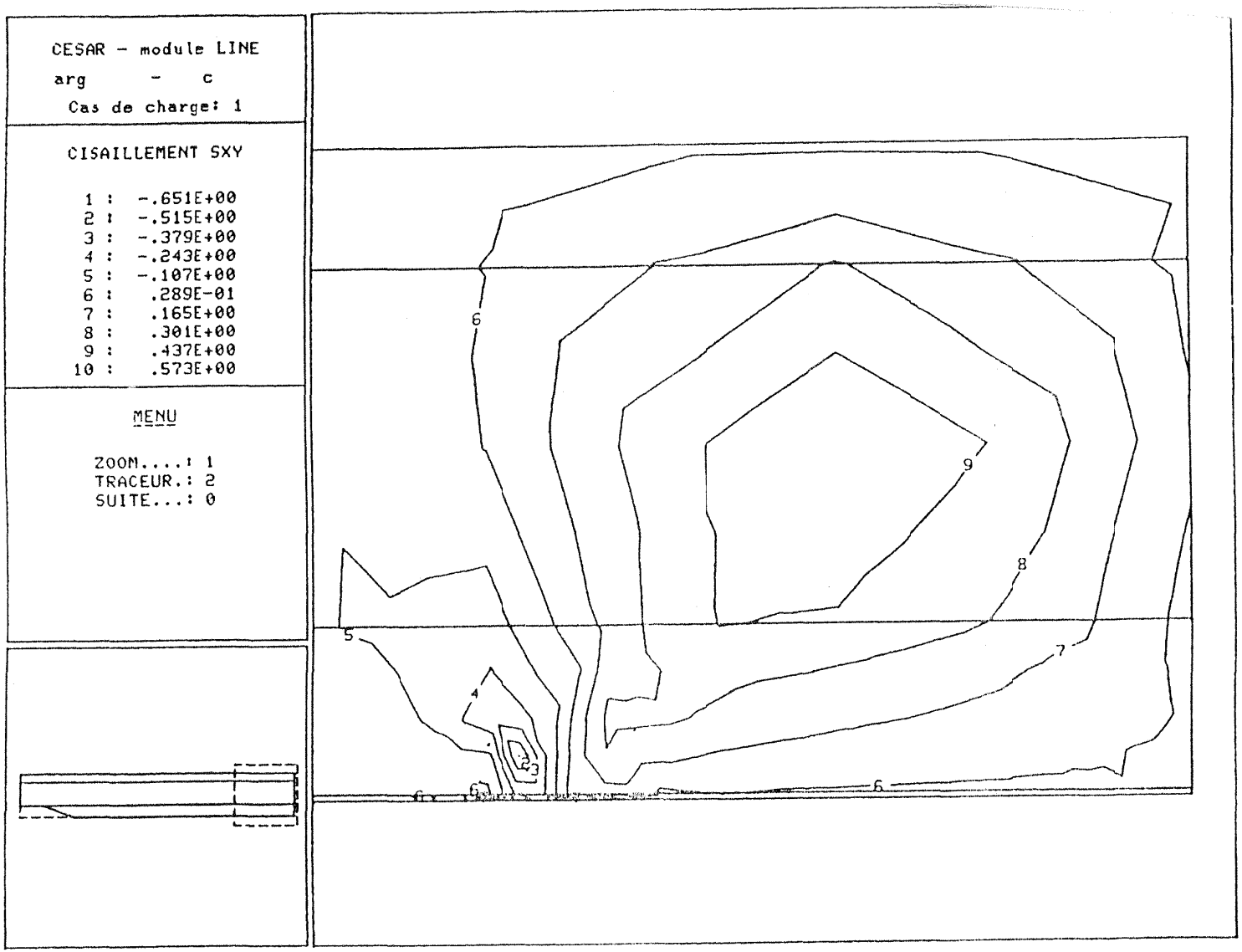


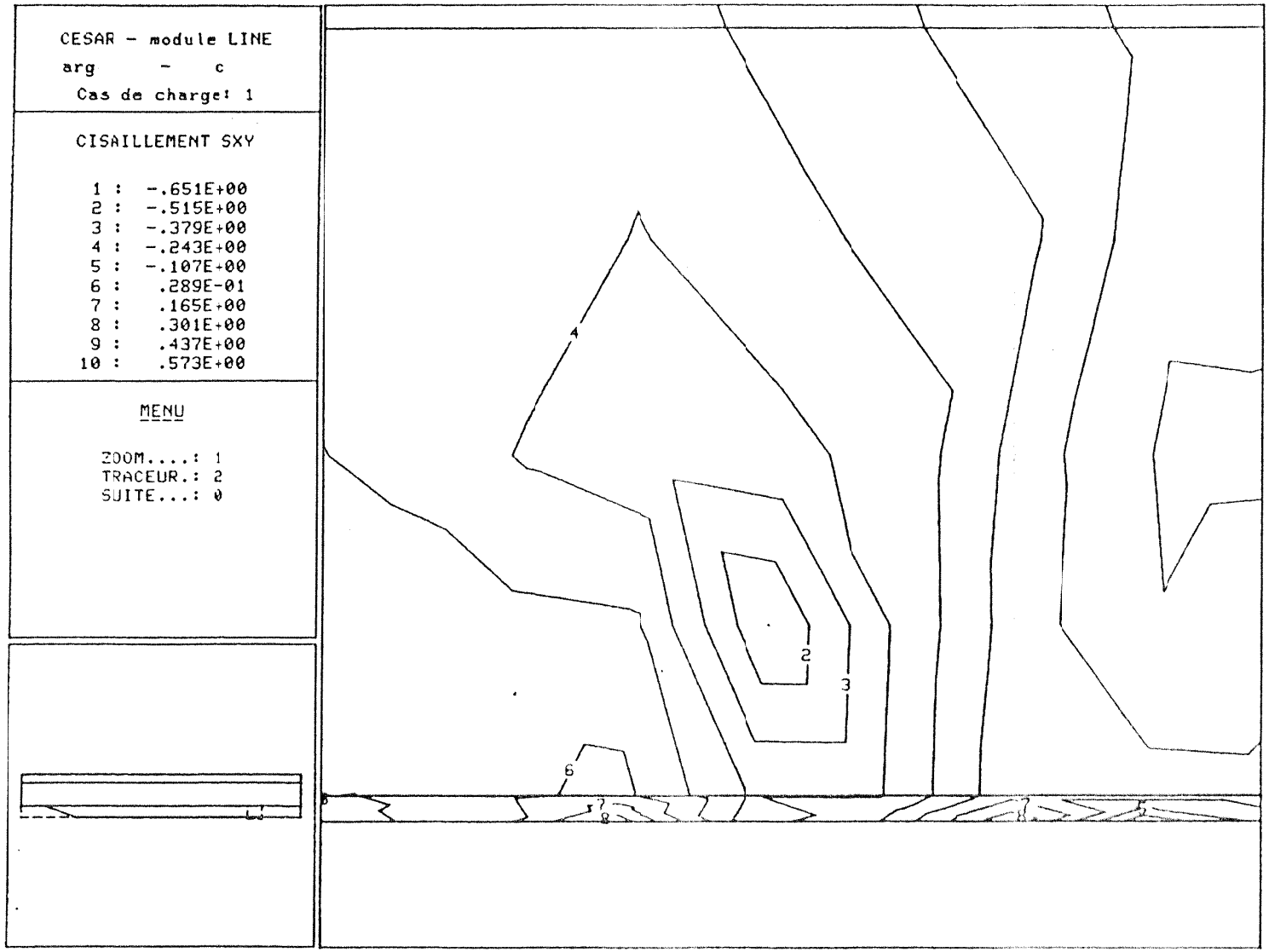



CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SX
1 : -.140E+01
2 : -.785E+00
3 : -.175E+00
4 : .435E+00
5 : .105E+01
6 : .166E+01
7 : .227E+01
8 : .288E+01
9 : .349E+01
10 : .410E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
5
5
6
7
8
9


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CONTRAINTE SY
1 : -.224E+01
2 : -.129E+01
3 : -.349E+00
4 : .596E+00
5 : .154E+01
6 : .249E+01
7 : .343E+01
8 : .438E+01
9 : .532E+01
10 : .627E+01
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.651E+00
2 : -.515E+00
3 : -.379E+00
4 : -.243E+00
5 : -.107E+00
6 : .289E-01
7 : .165E+00
8 : .301E+00
9 : .437E+00
10 : .573E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
6
9
8
5
7
4
6
6


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.651E+00
2 : -.515E+00
3 : -.379E+00
4 : -.243E+00
5 : -.107E+00
6 : .289E-01
7 : .165E+00
8 : .301E+00
9 : .437E+00
10 : .573E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
6
9
8
5
7
4
3
6
6

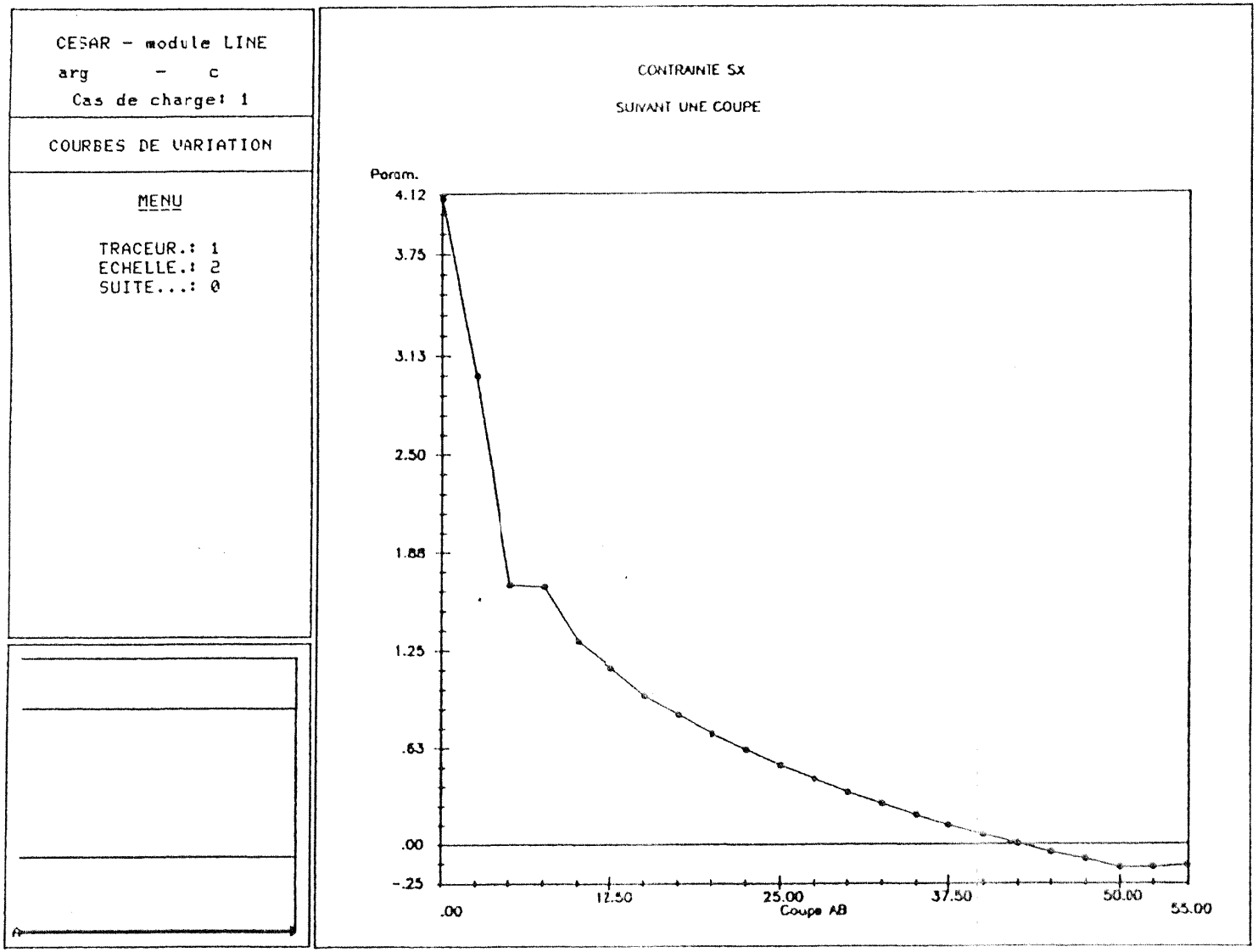

CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1
CISAILLEMENT SXY
1 : -.651E+00
2 : -.515E+00
3 : -.379E+00
4 : -.243E+00
5 : -.107E+00
6 : .289E-01
7 : .165E+00
8 : .301E+00
9 : .437E+00
10 : .573E+00
MENU
ZOOM....: 1
TRACEUR.: 2
SUITE...: 0
4
2
3
6

CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CESAR - module LINE

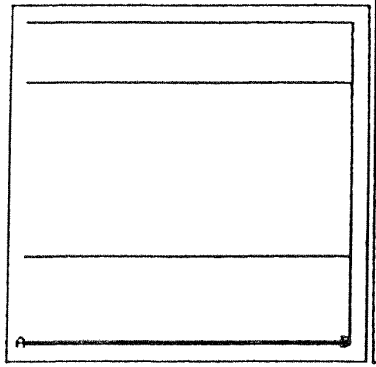
arg - c

Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

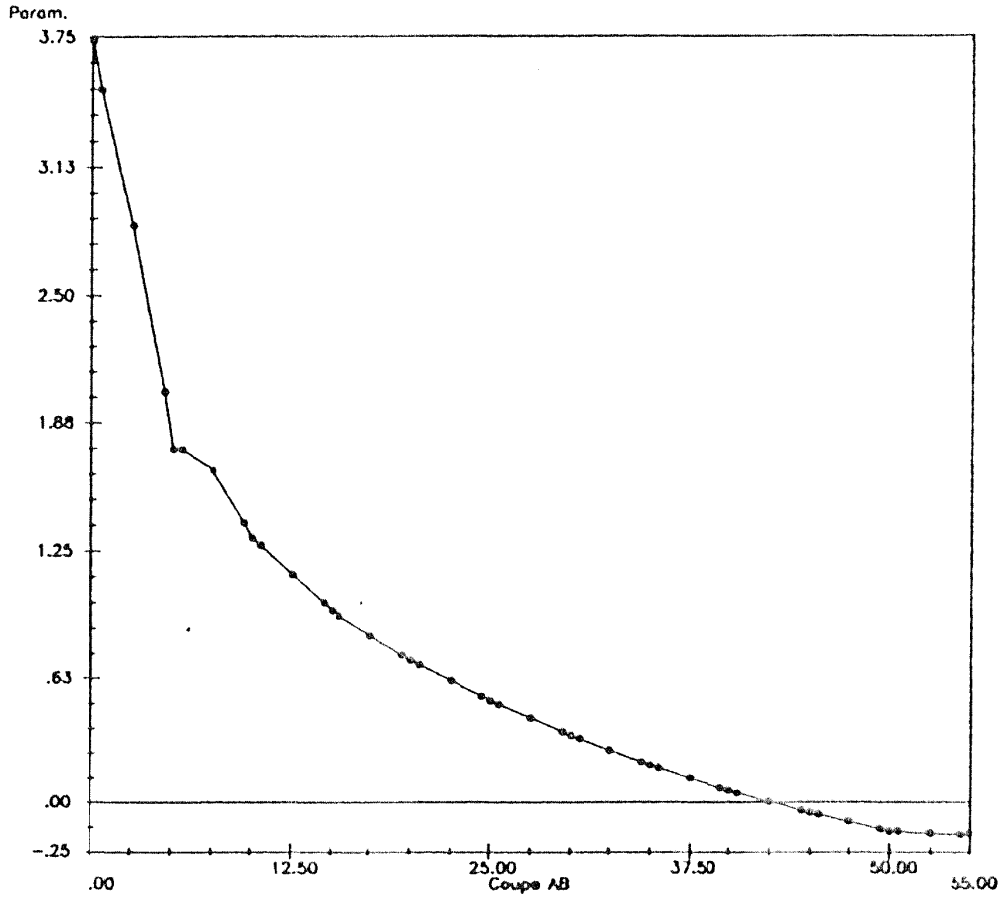
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE Sx

SUIVANT UNE COUPE

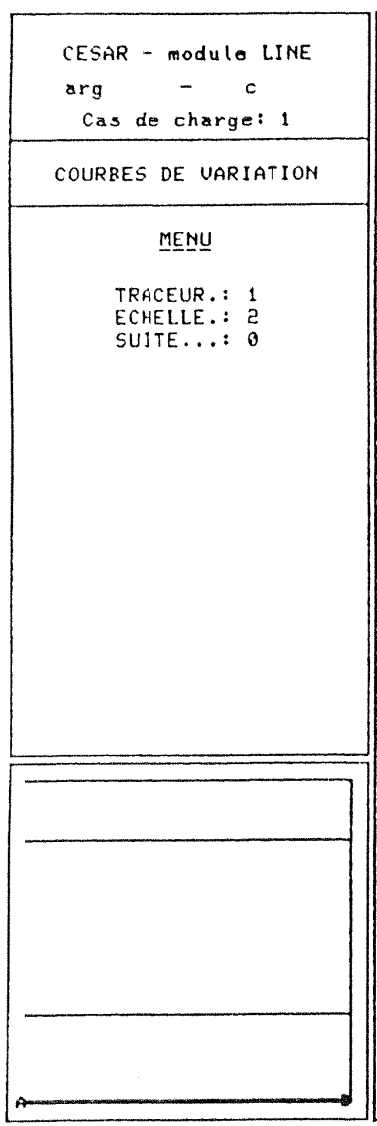


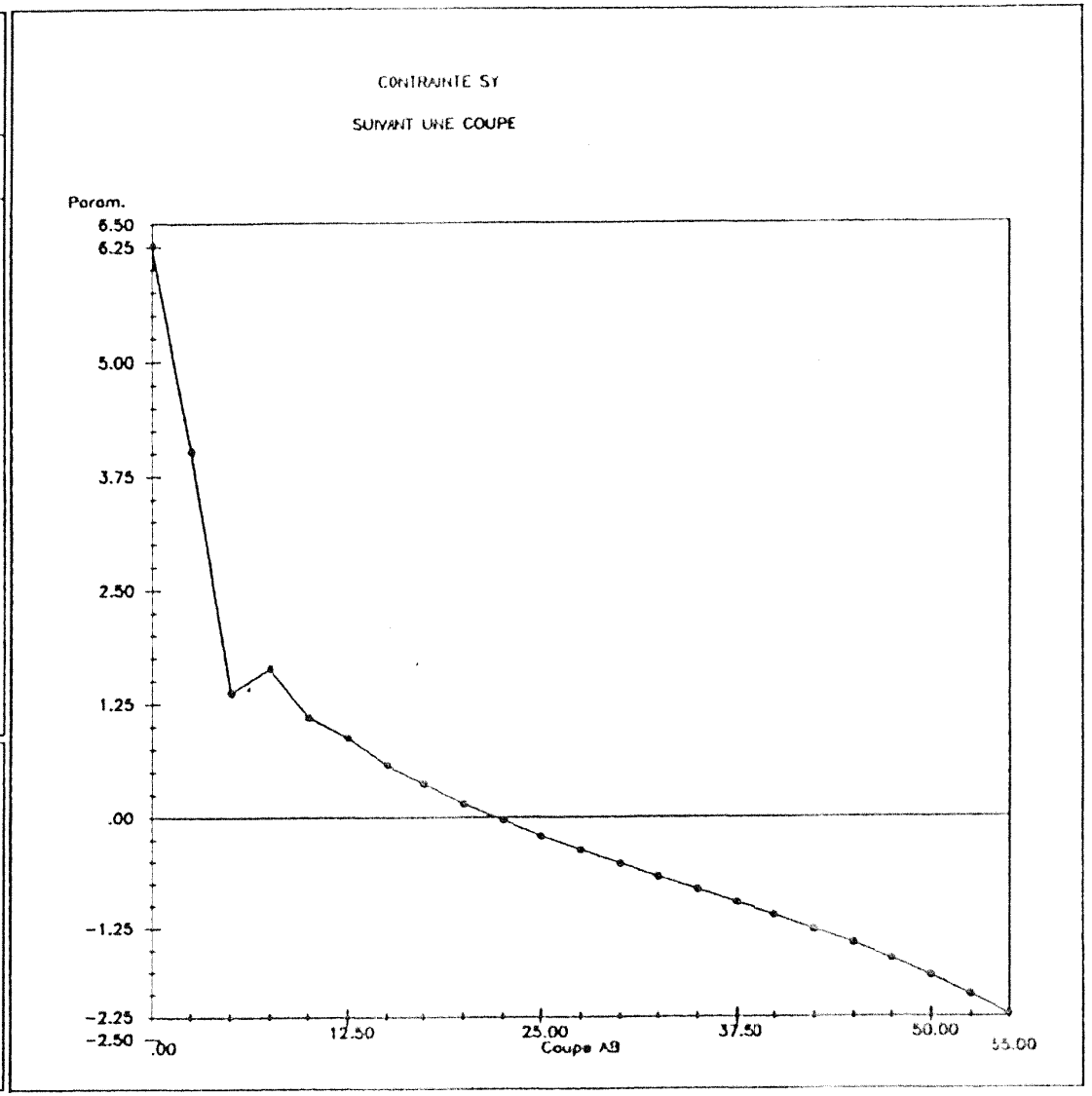
CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



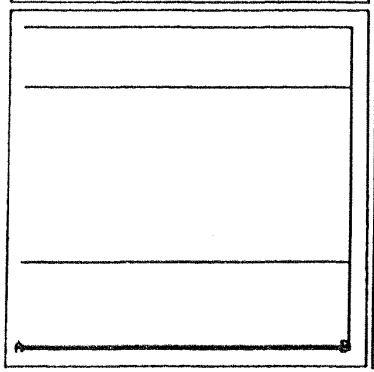


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

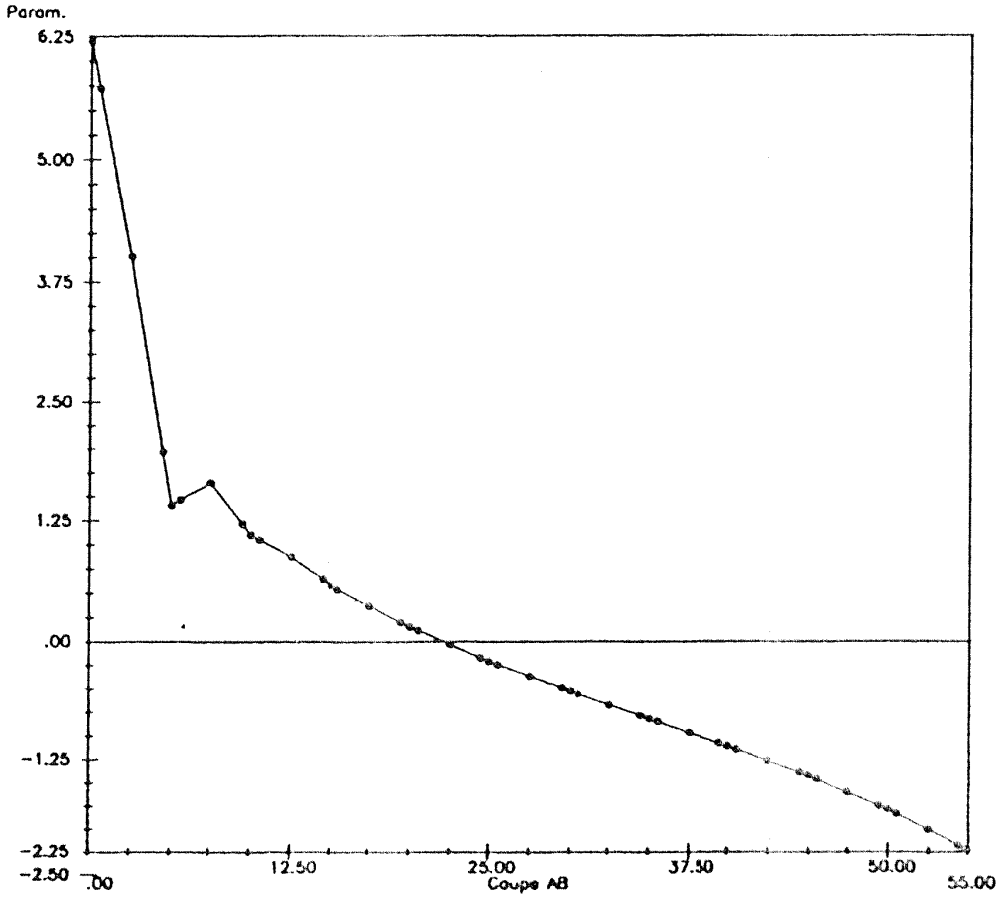
MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



CONTRAINTE SY

SUIVANT UNE COUPE

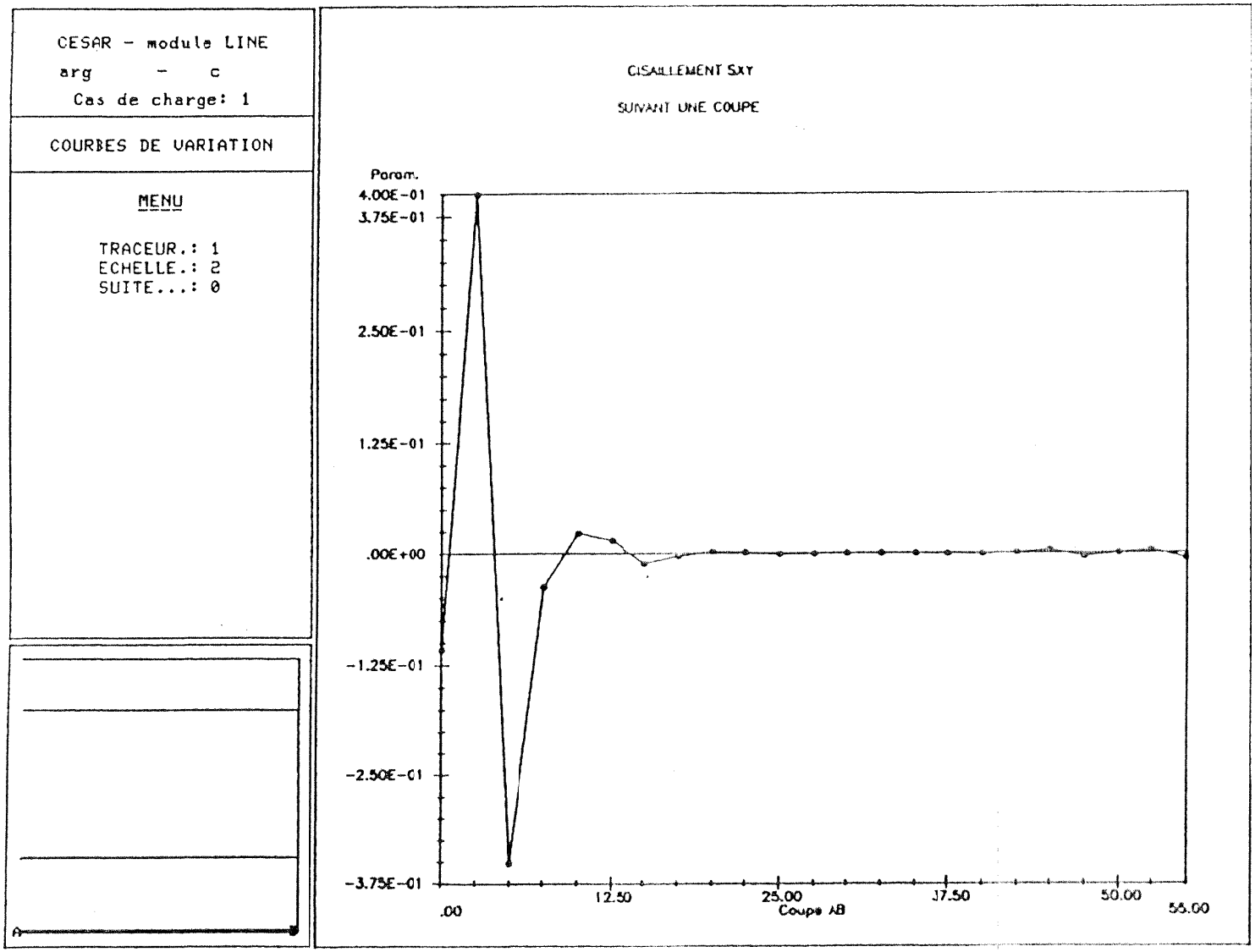


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

MENU

TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0

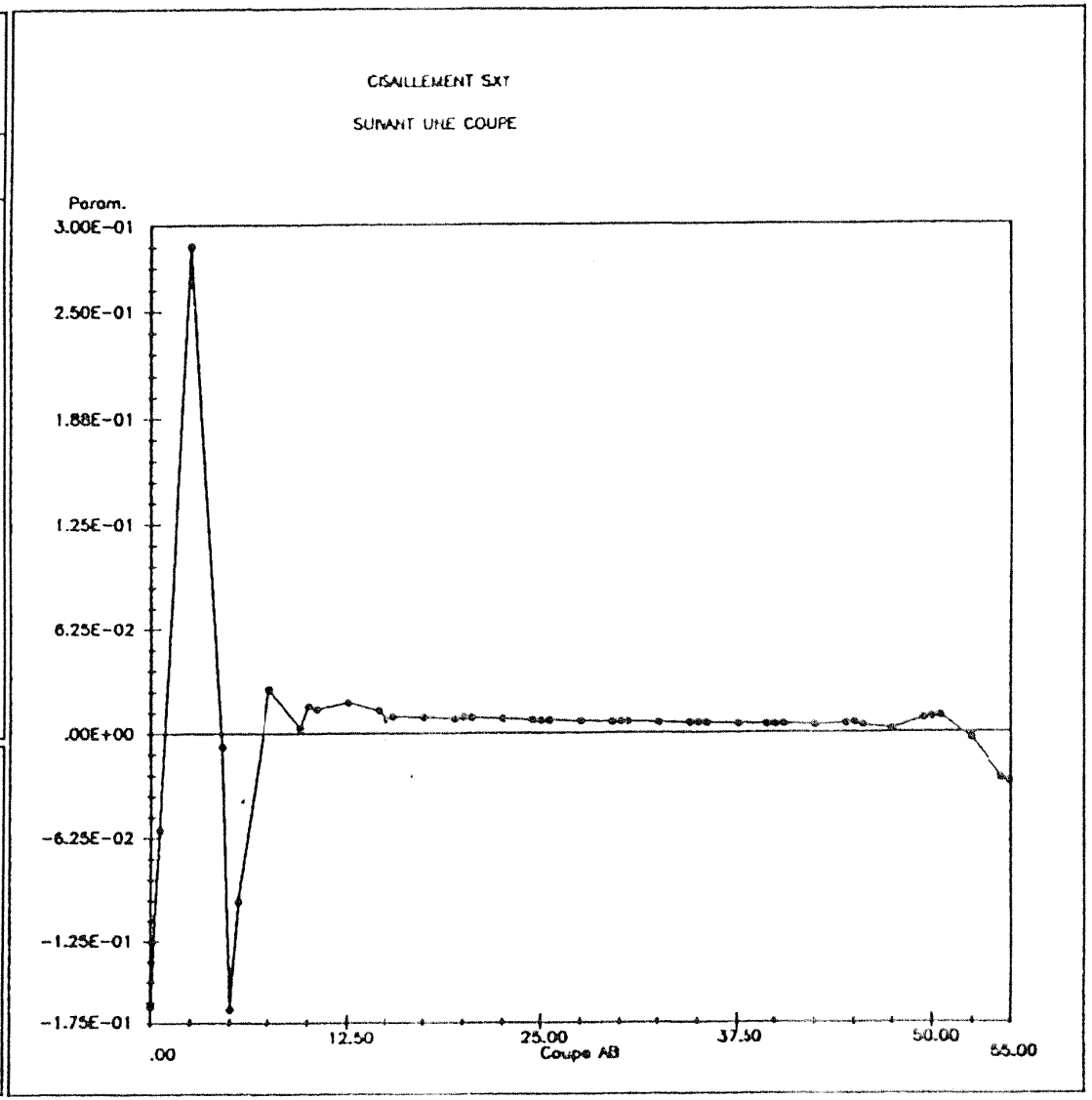


CESAR - module LINE
arg - c
Cas de charge: 1

COURBES DE VARIATION

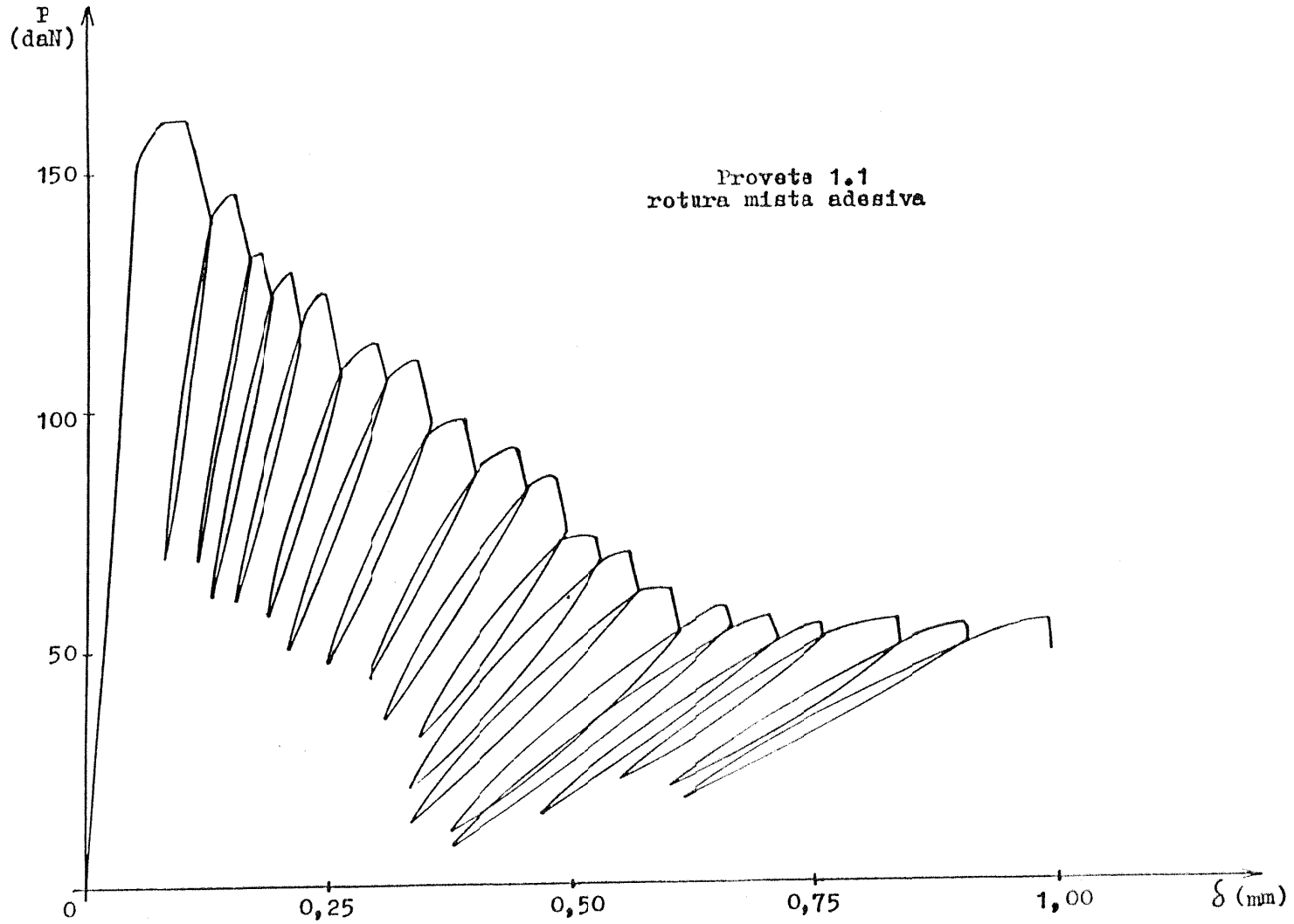
MENU

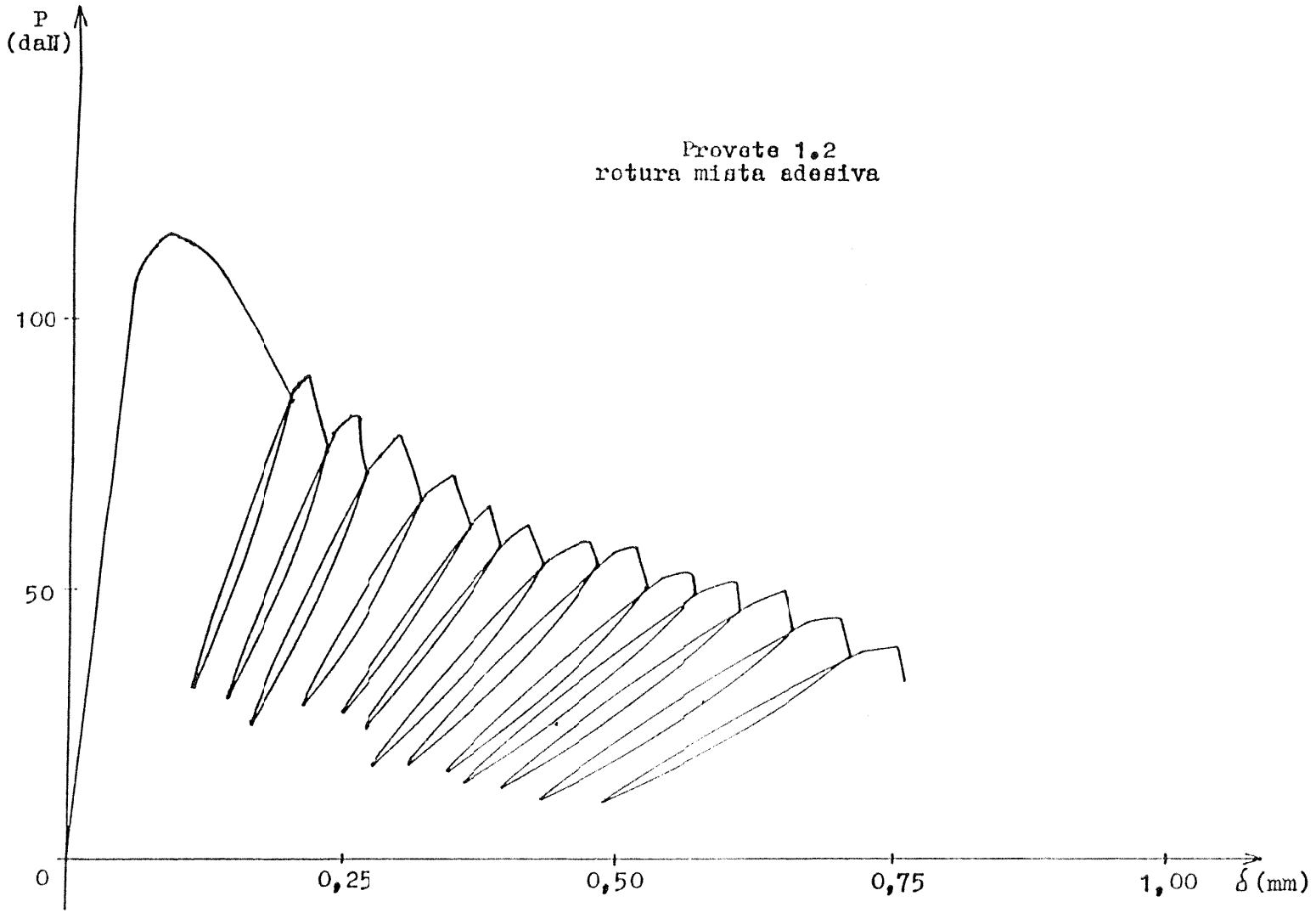
TRACEUR.: 1
ECHELLE.: 2
SUITE...: 0



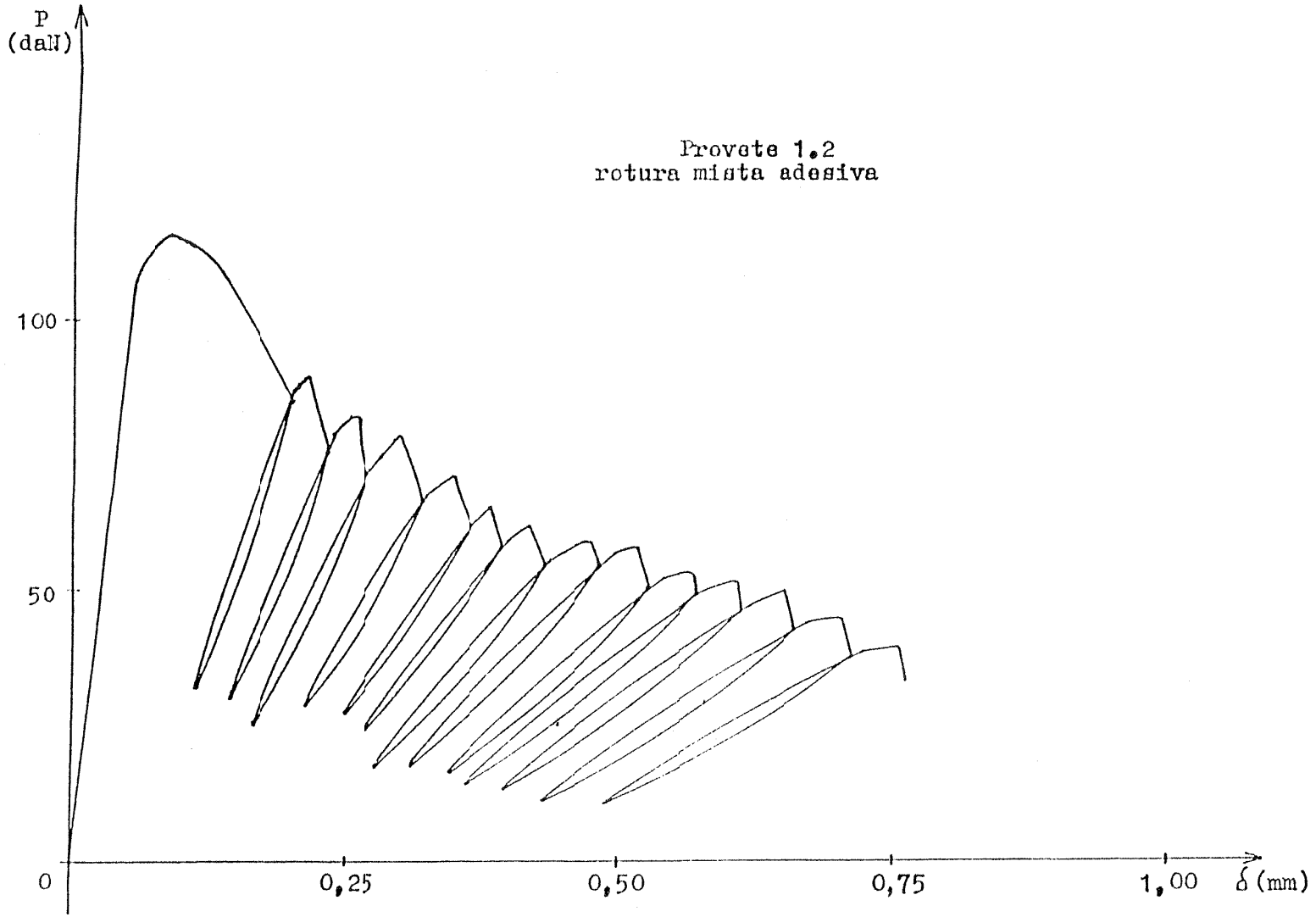
— ANEXO 4 —

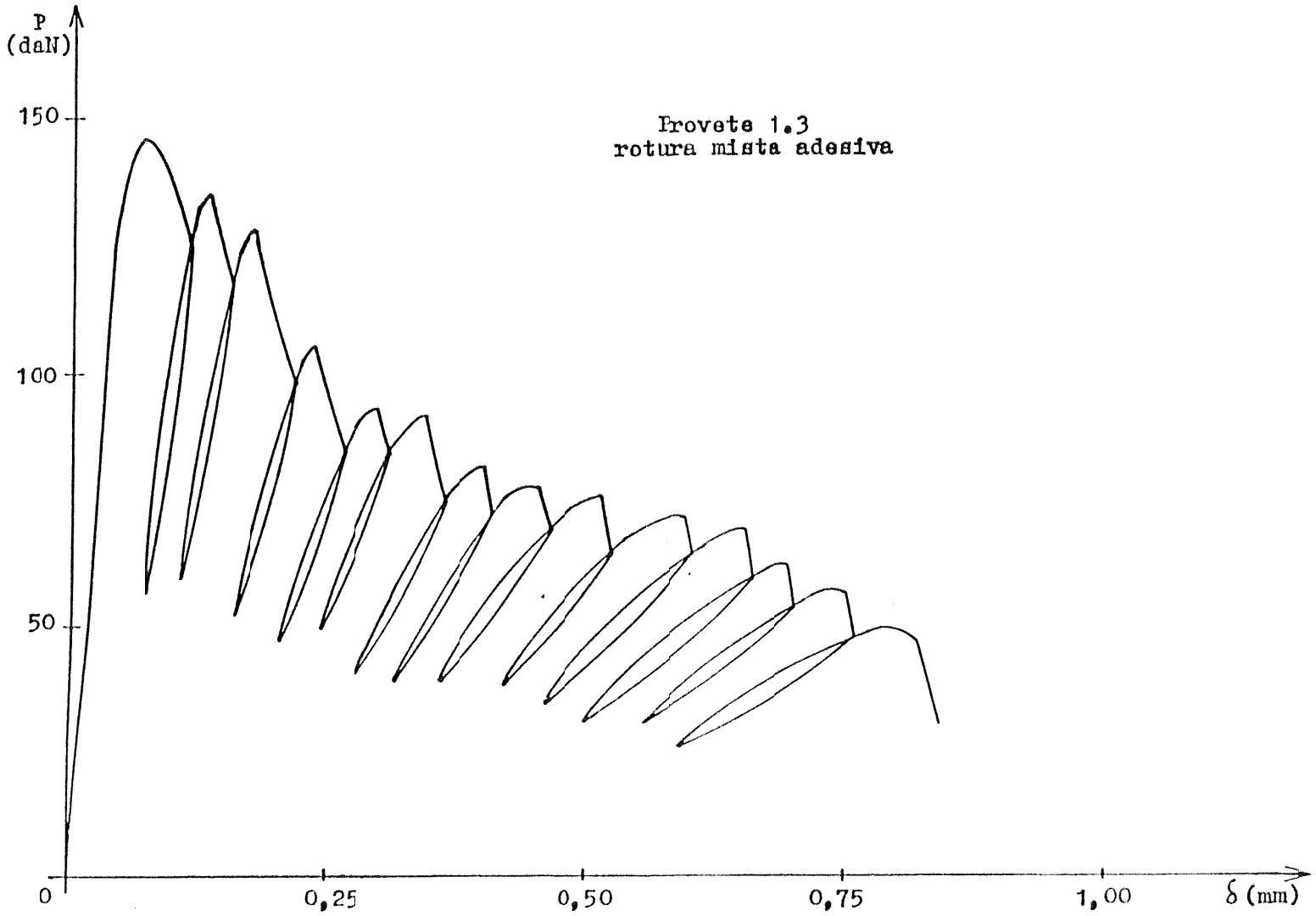
— CURVAS $P - \delta$ OBTIDAS NOS ENSAIOS COM PROVETES TIPO DCB - SÉRIE DE ENSAIOS NO. 1 —

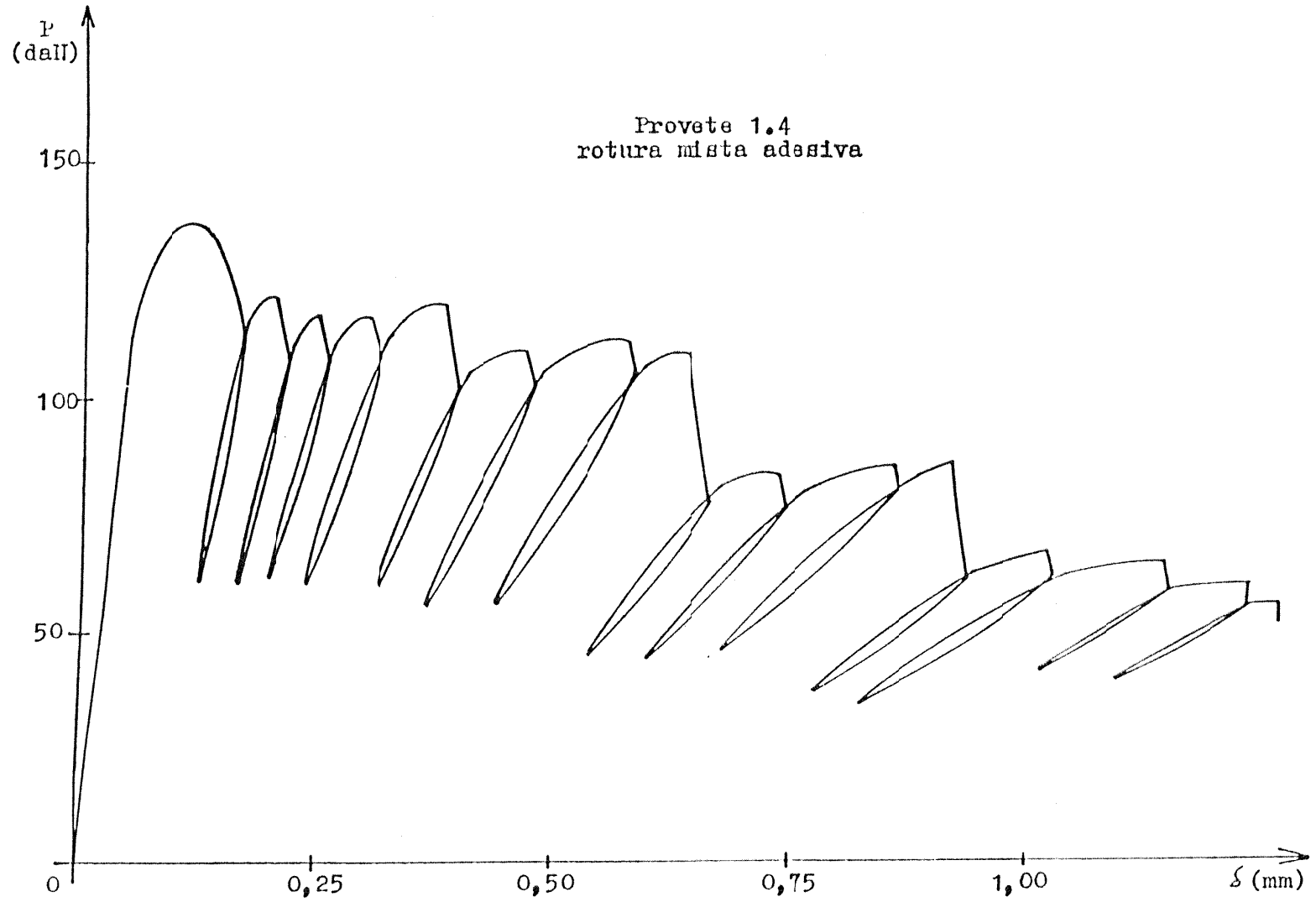

P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)
Provata 1.1
rotura mista adesiva



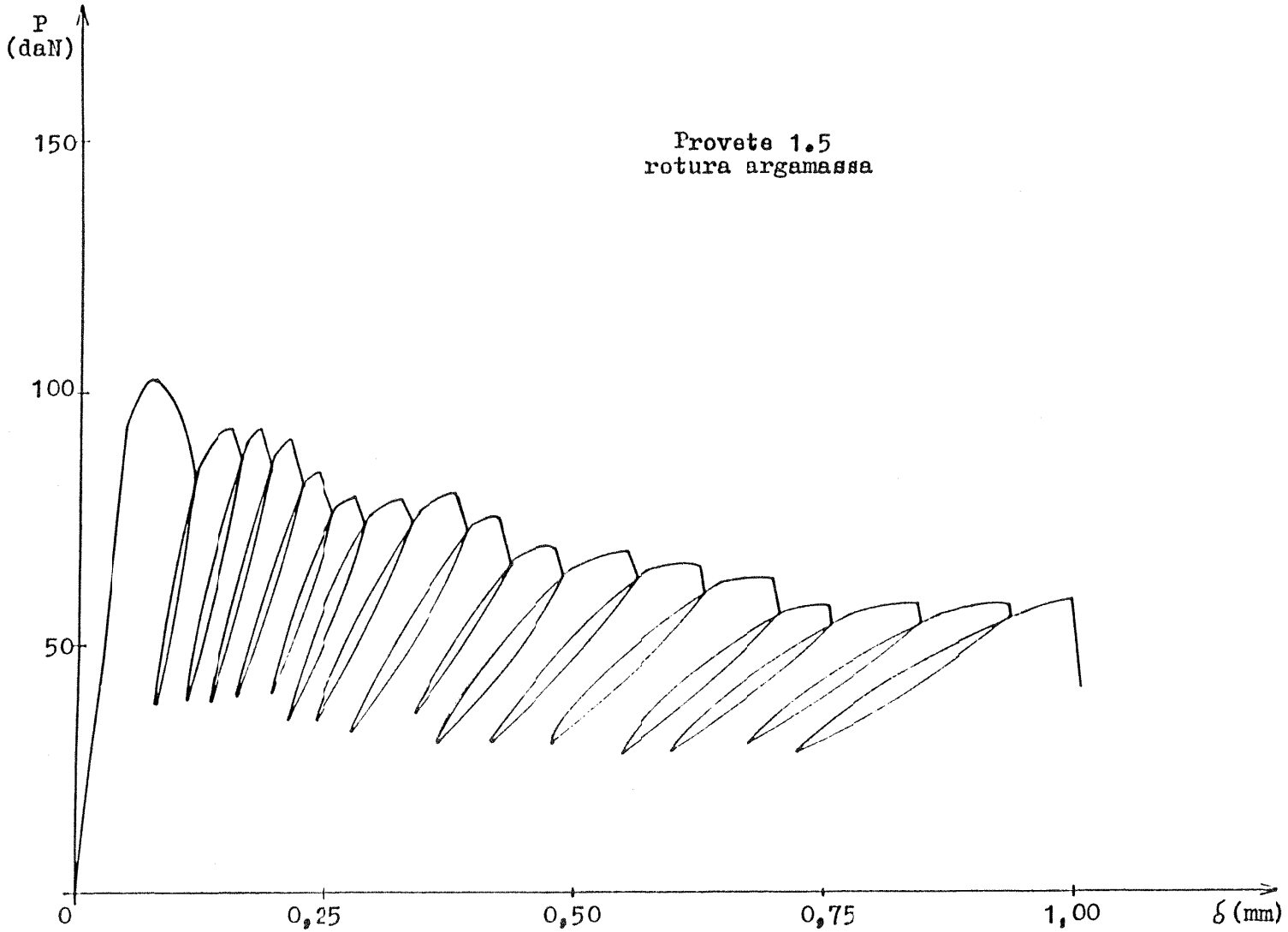
Provete 1.2
rotura mista adesiva

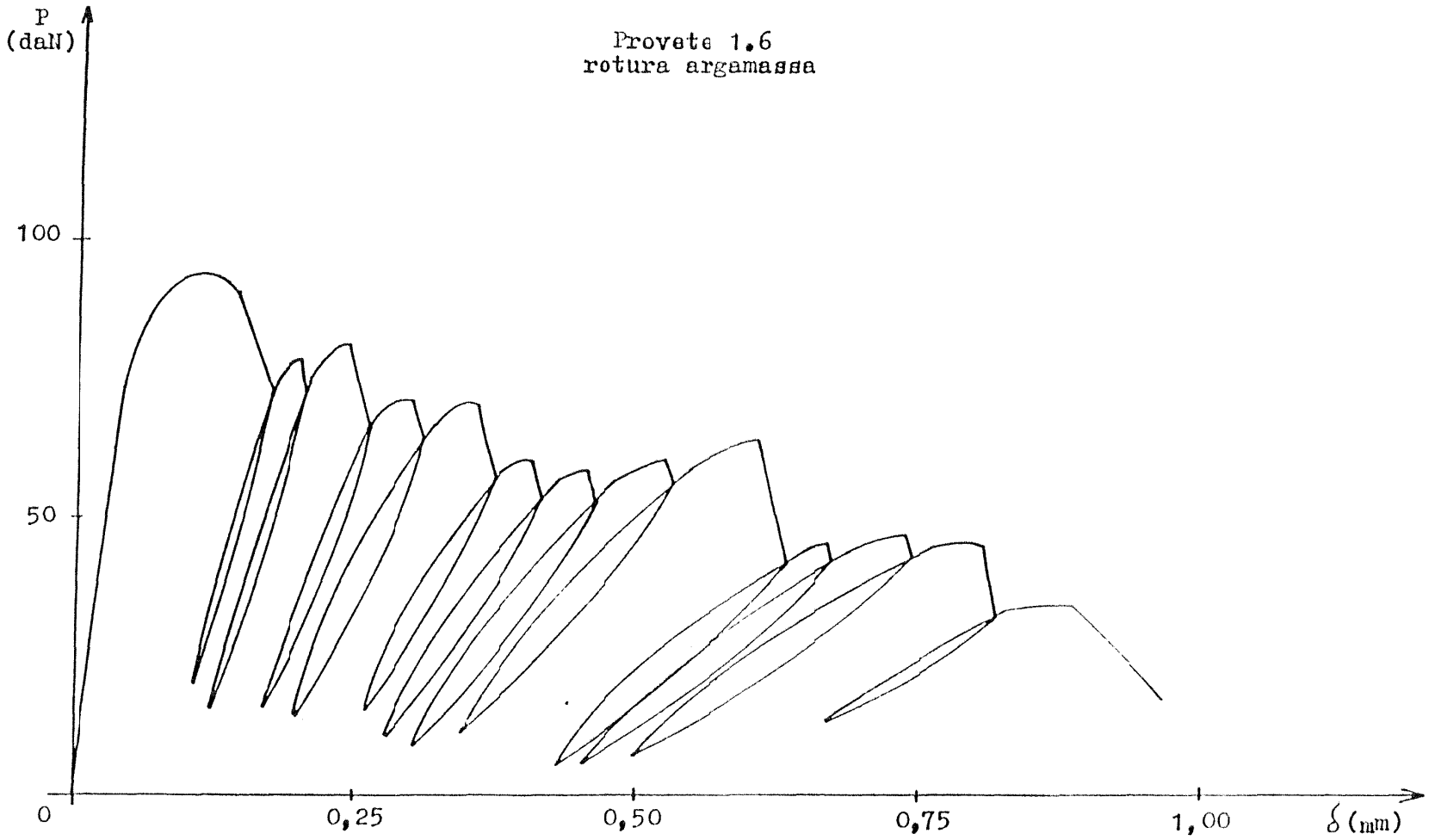

P
(daN)
Provete 1.2
rotura mista adesiva
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)

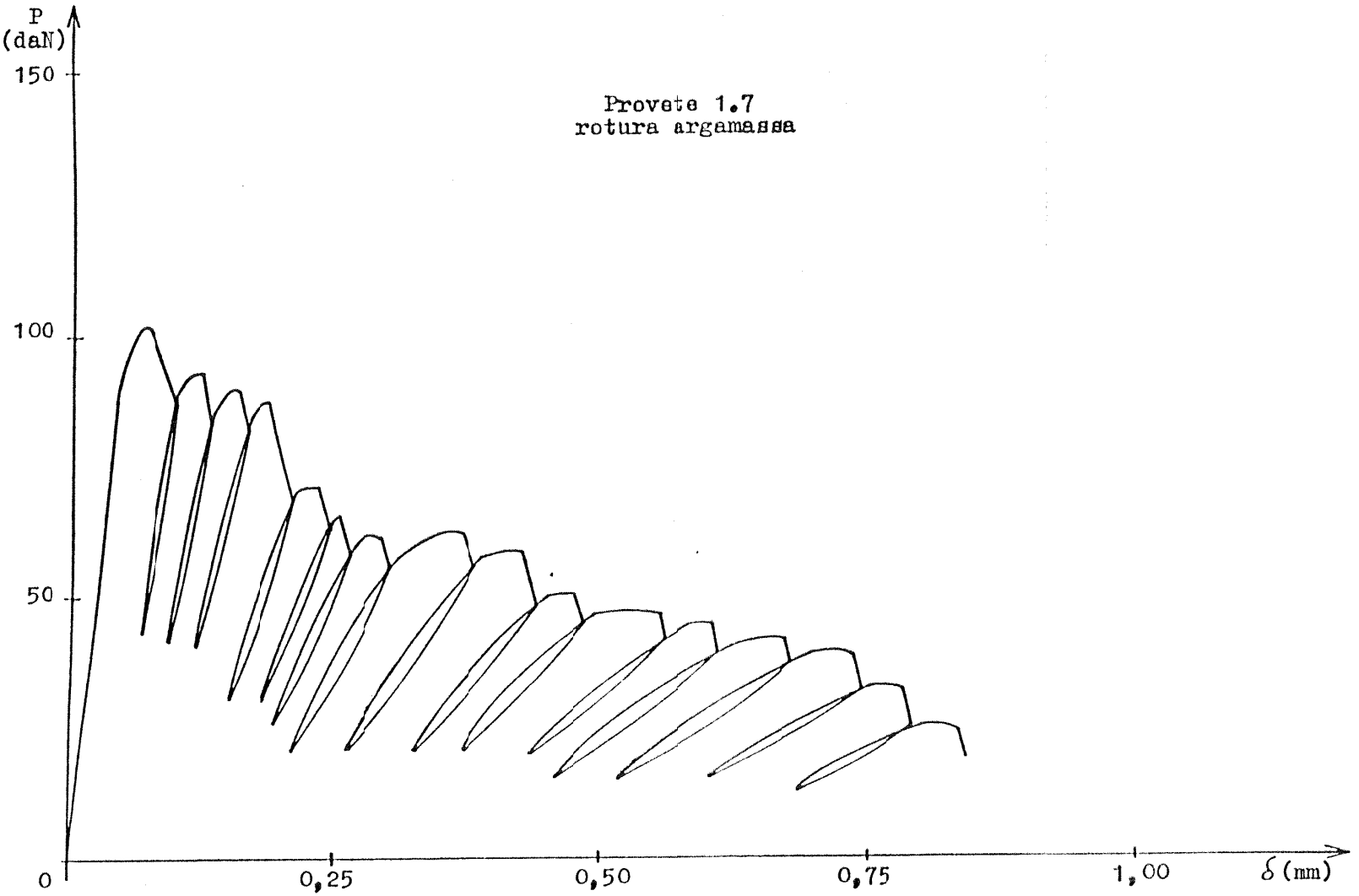

P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)
Provete 1.3
rotura mista adesiva

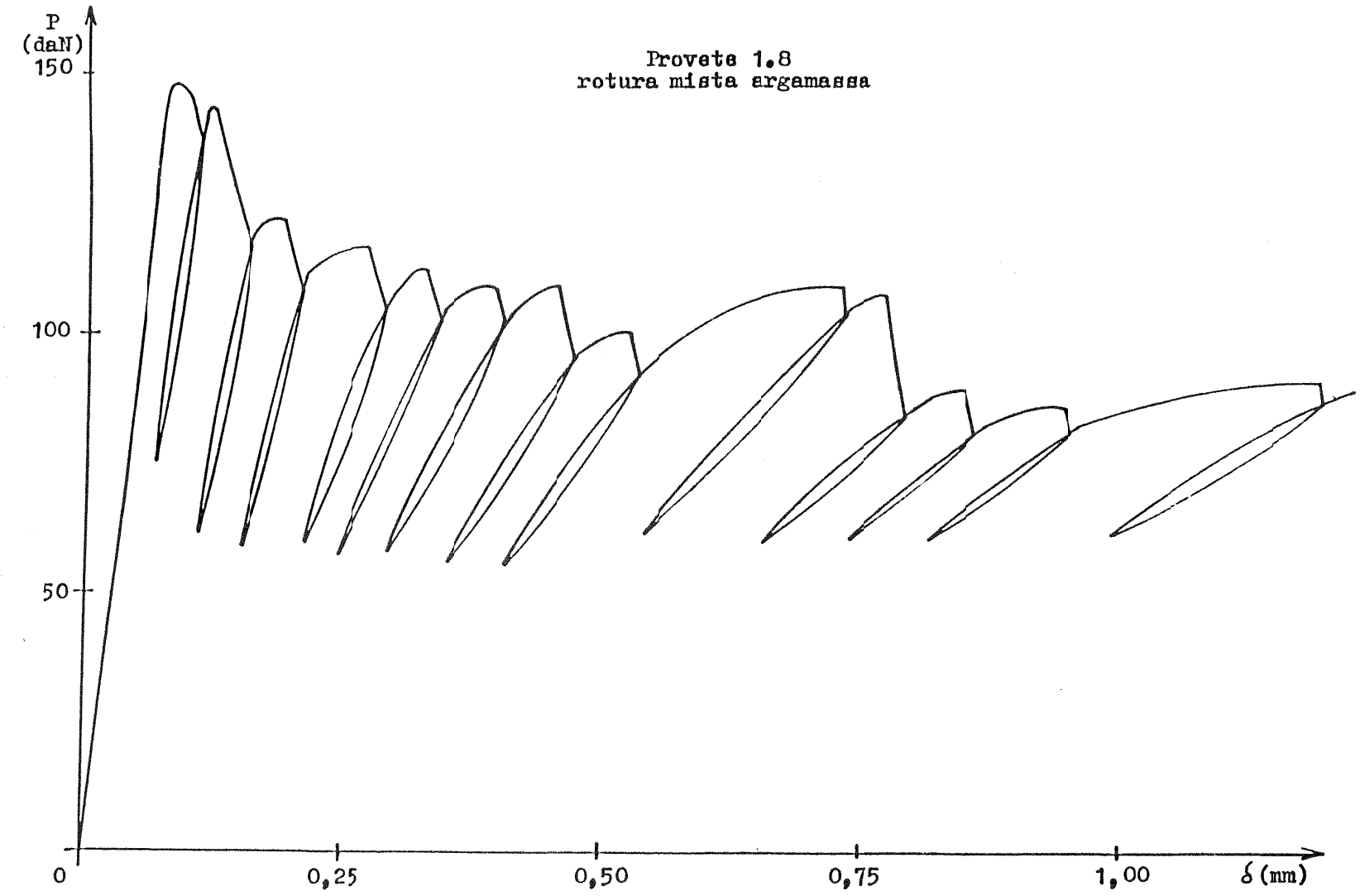


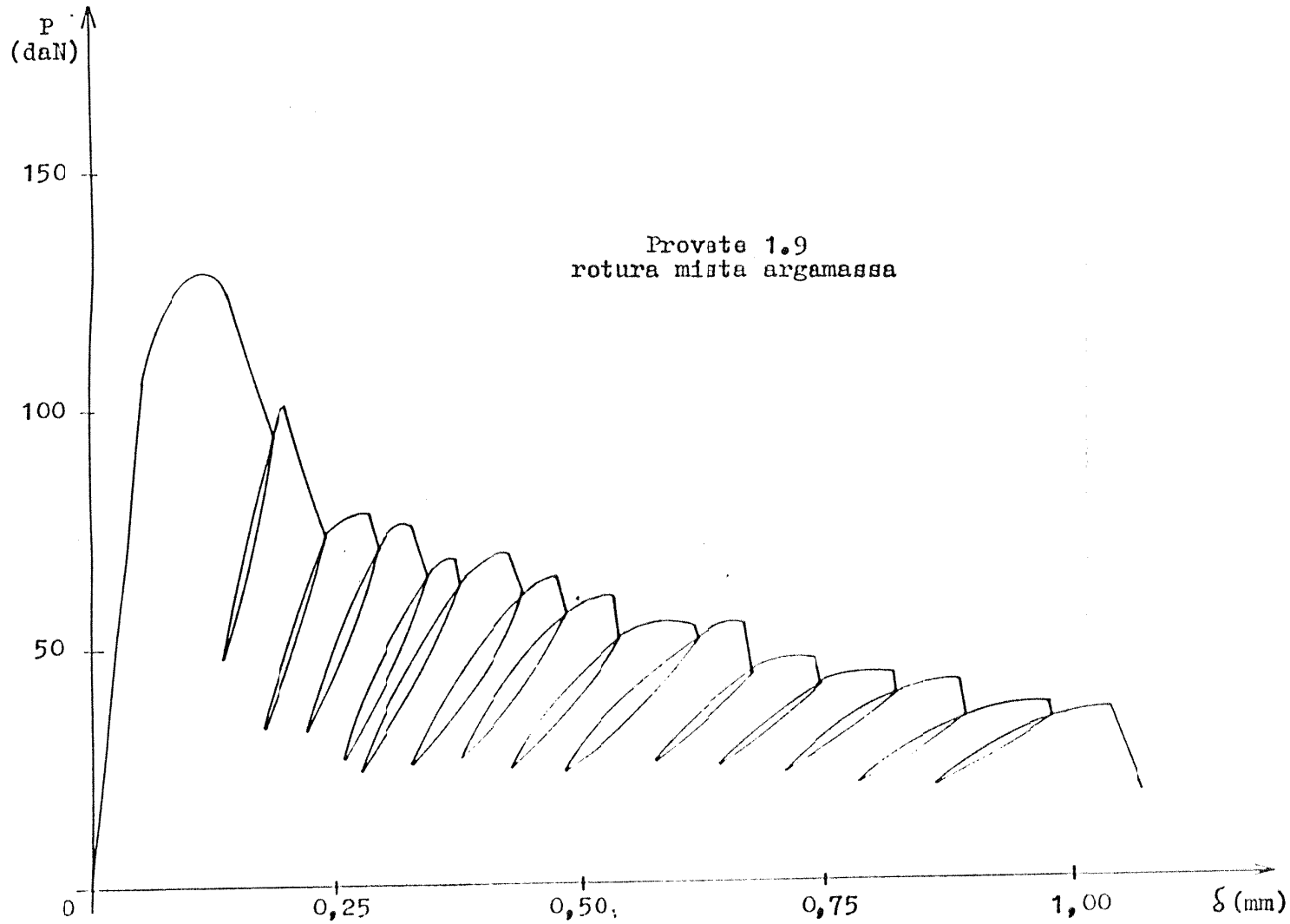
Provete 1.4
rotura mista adesiva


P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)
Provete 1.5
rotura argamassa


P
(daN)
Provete 1.6
rotura argamassa
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)

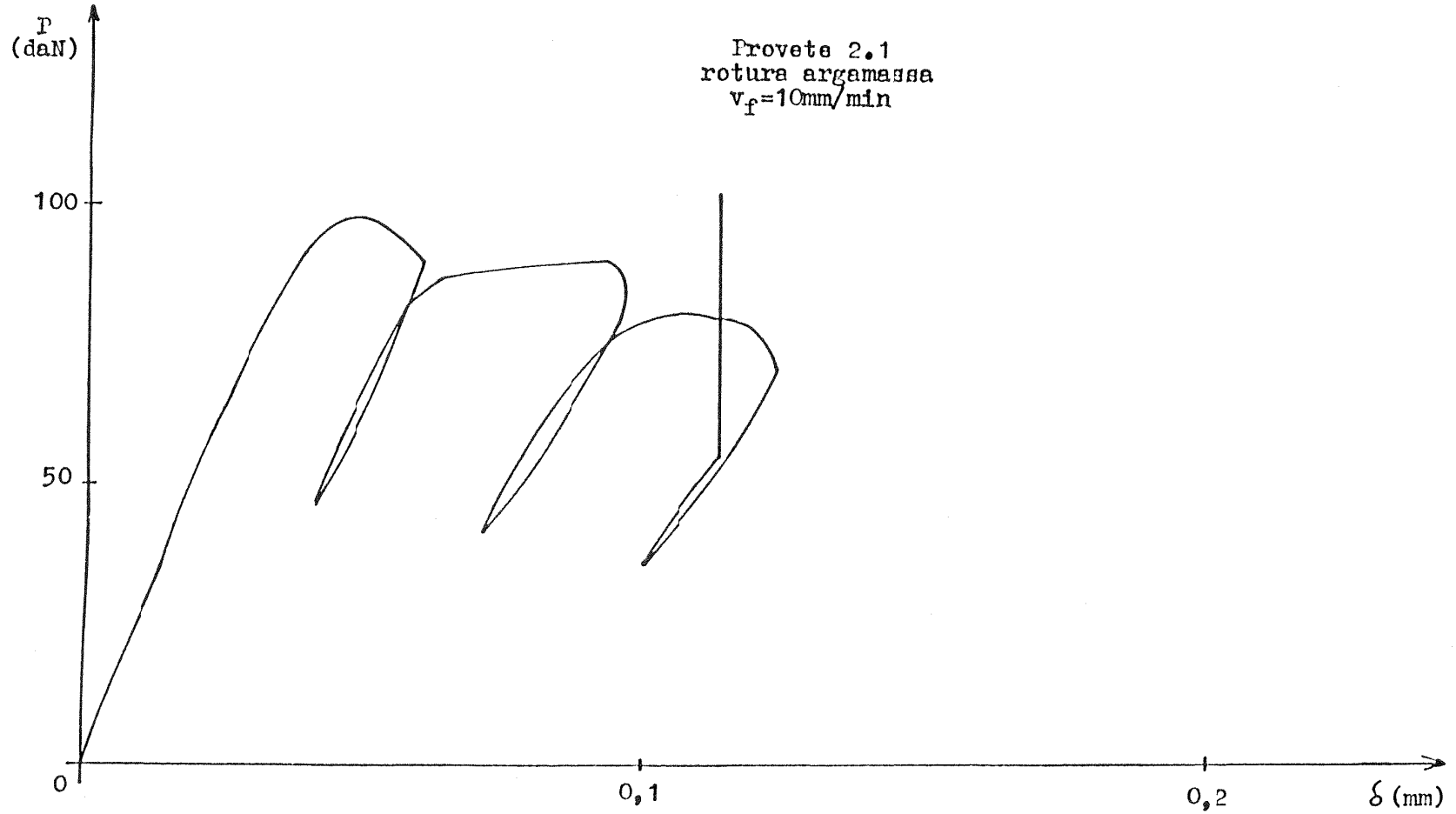

Provete 1.7
rotura argamassa
P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)

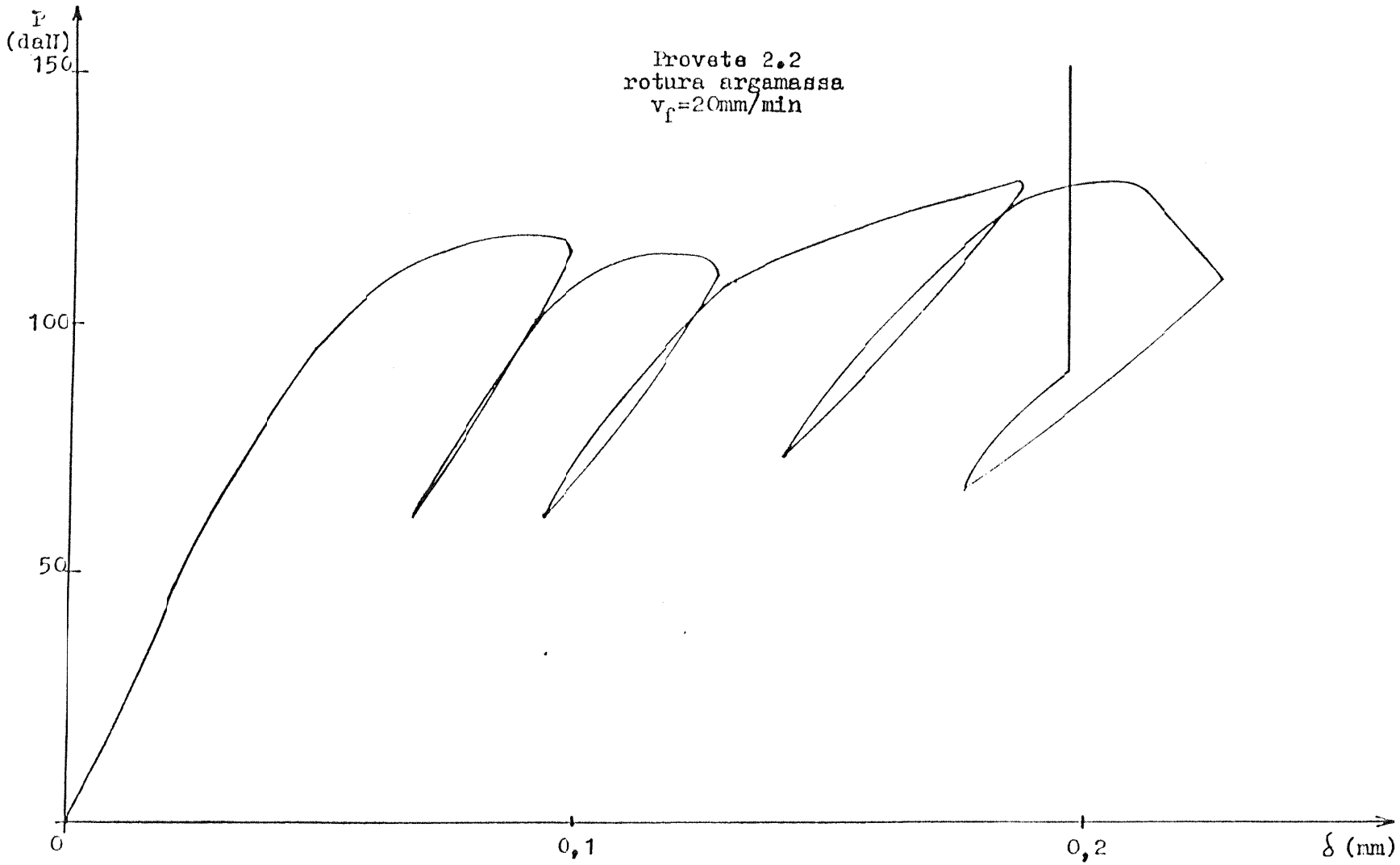

Provete 1.8
rotura mista argamassa
P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)


P
(daN)
150
100
50
0
0,25
0,50
0,75
1,00
δ (mm)
Provete 1.9
rotura mista argamassa

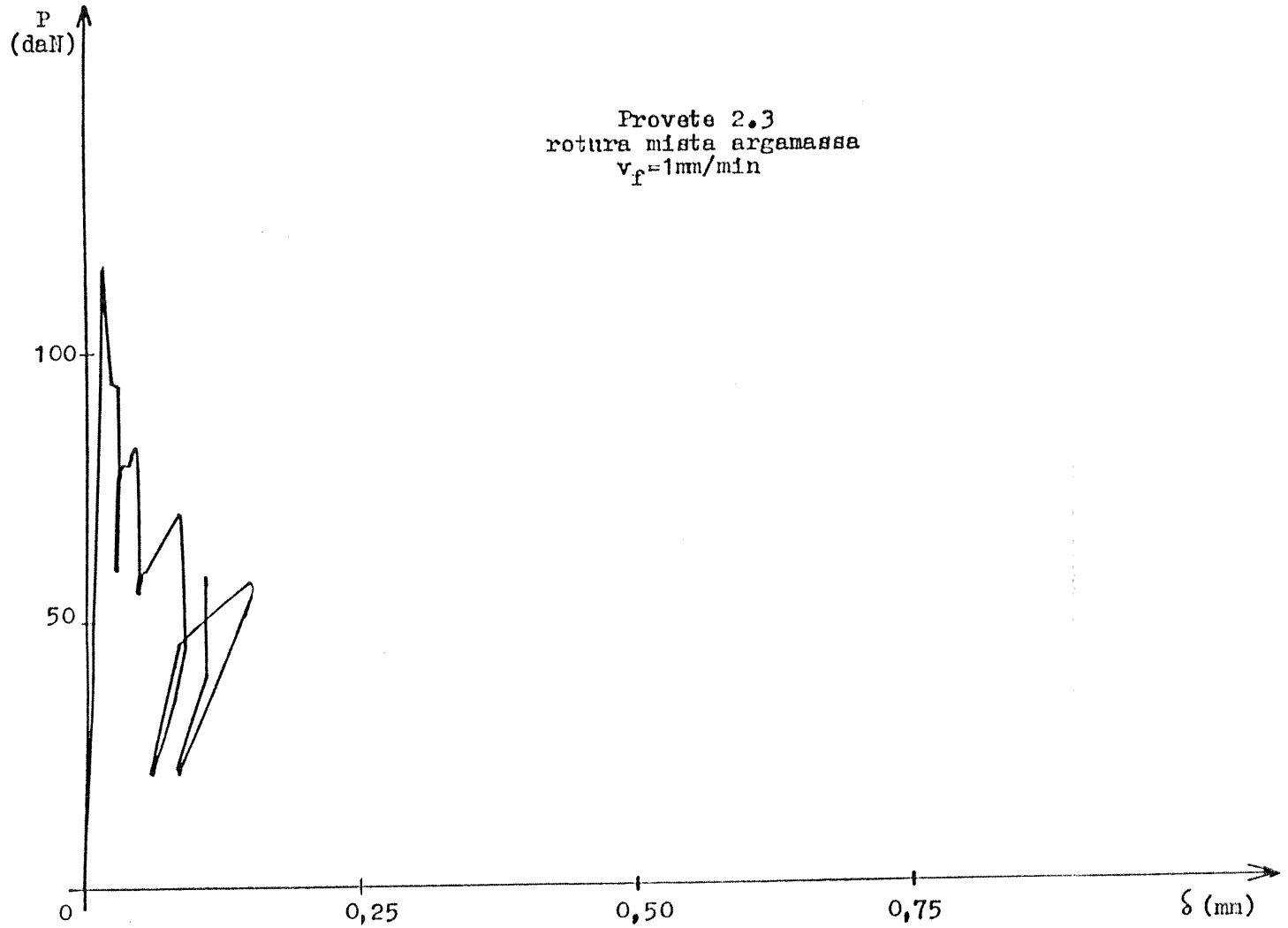
— ANEXO 5 —

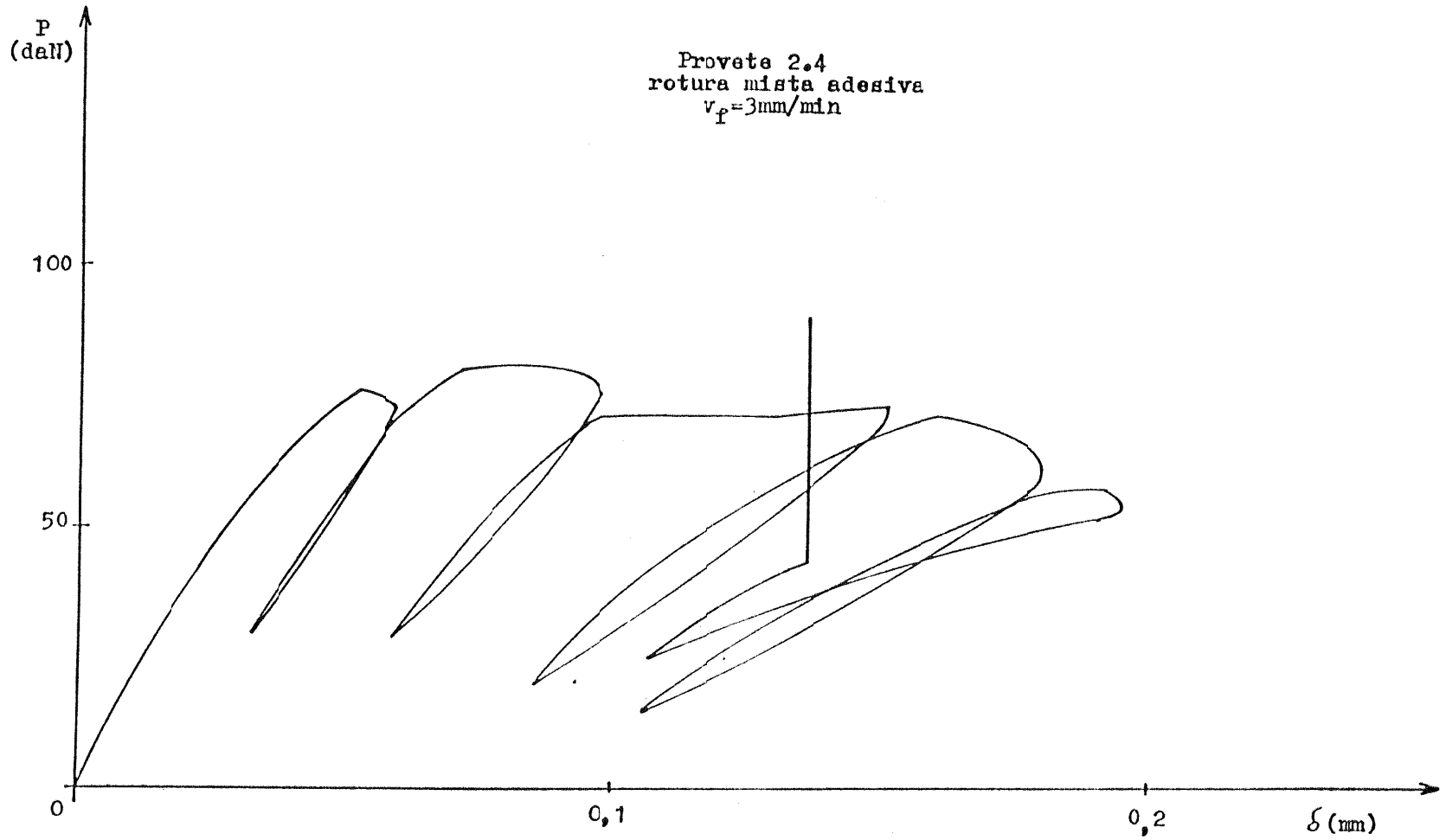
— CURVAS $P - \delta$ OBTIDAS NOS ENSAIOS COM PROVETES TIPO DCB - SÉRIE DE ENSAIOS NO. 2 —

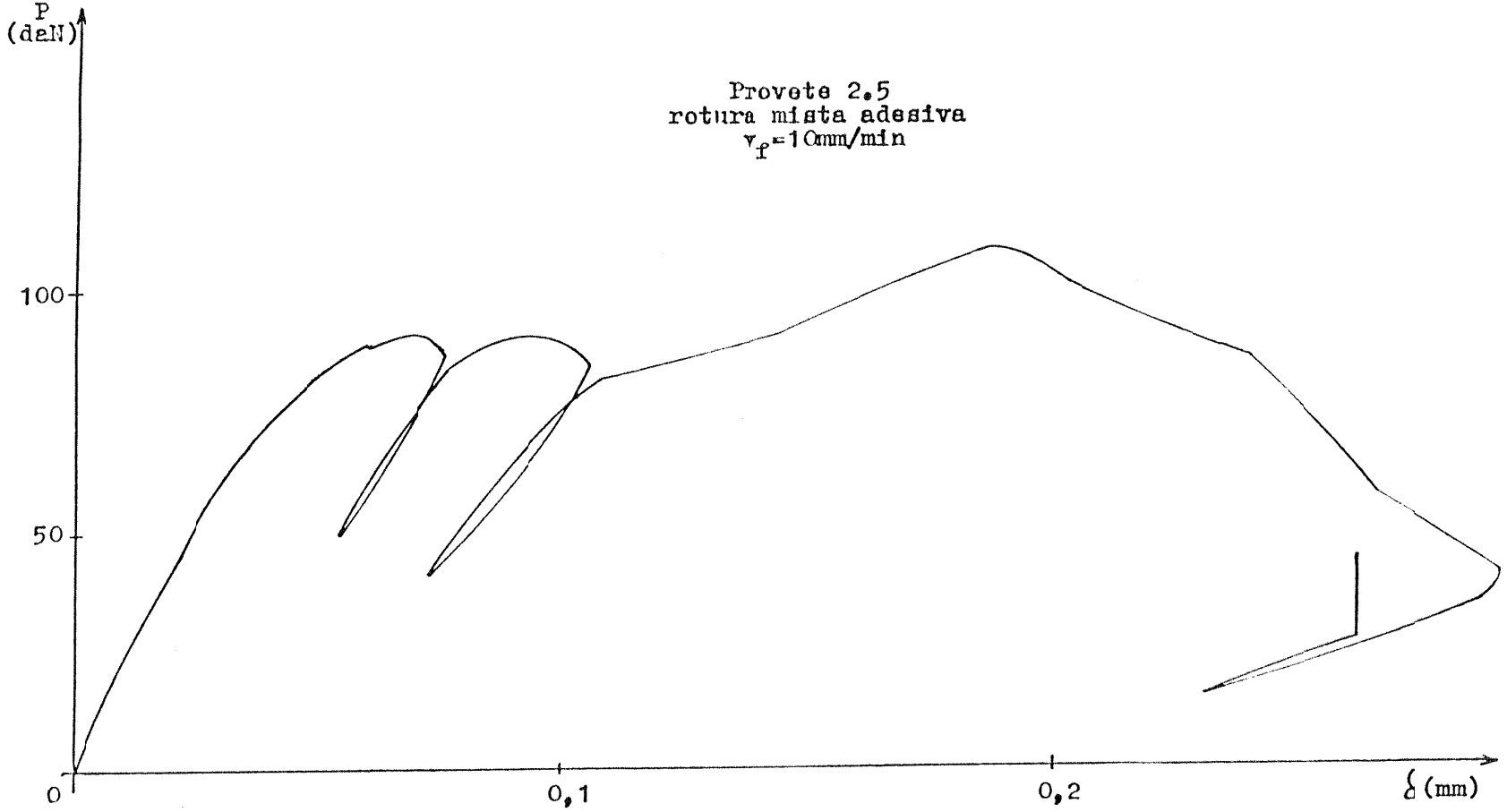

P
(daN)
Provete 2.1
rotura argamassa
v_f=10mm/min
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)

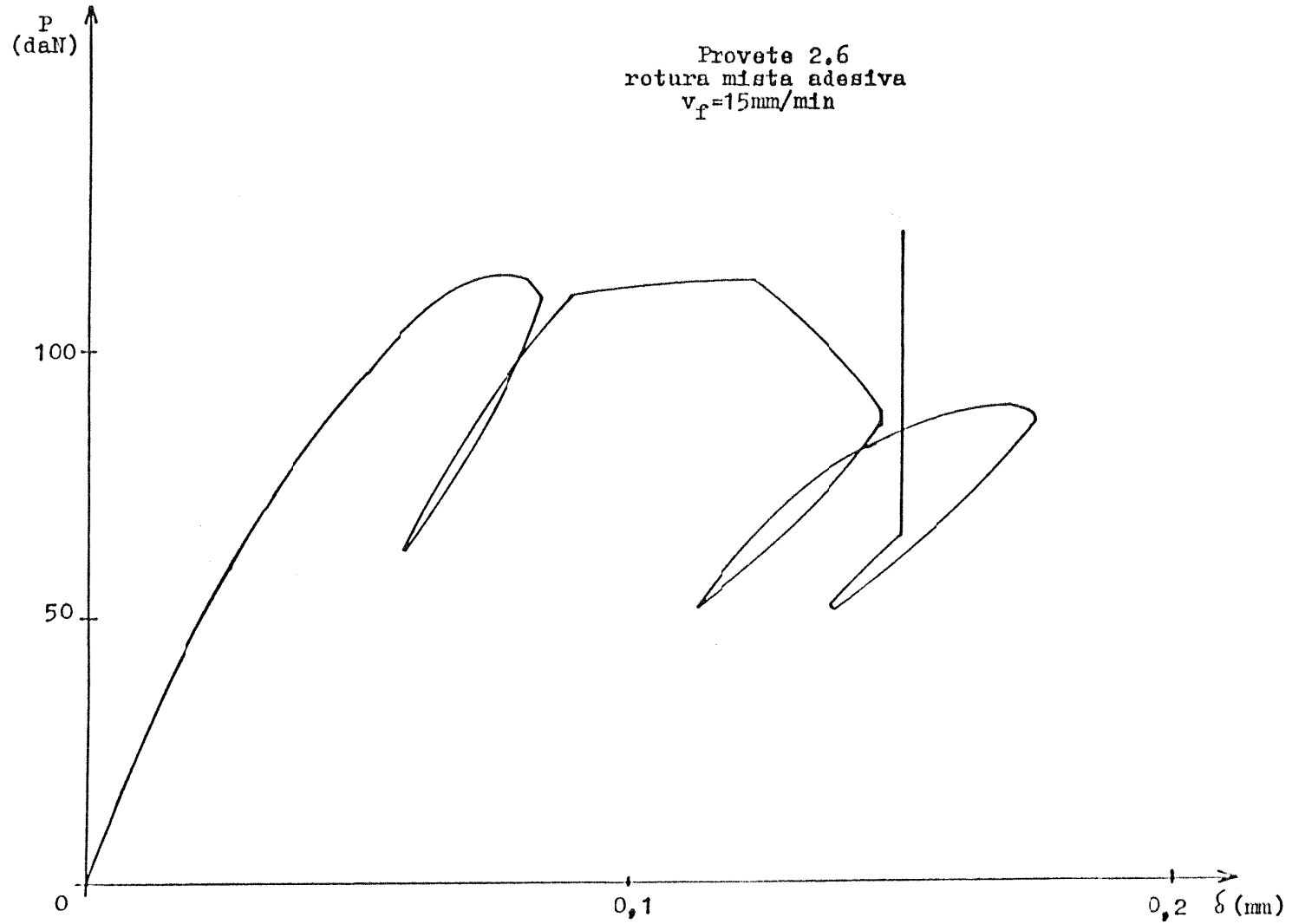

P
(daN)
150
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)
Provete 2.2
rotura argamassa
v_f=20mm/min

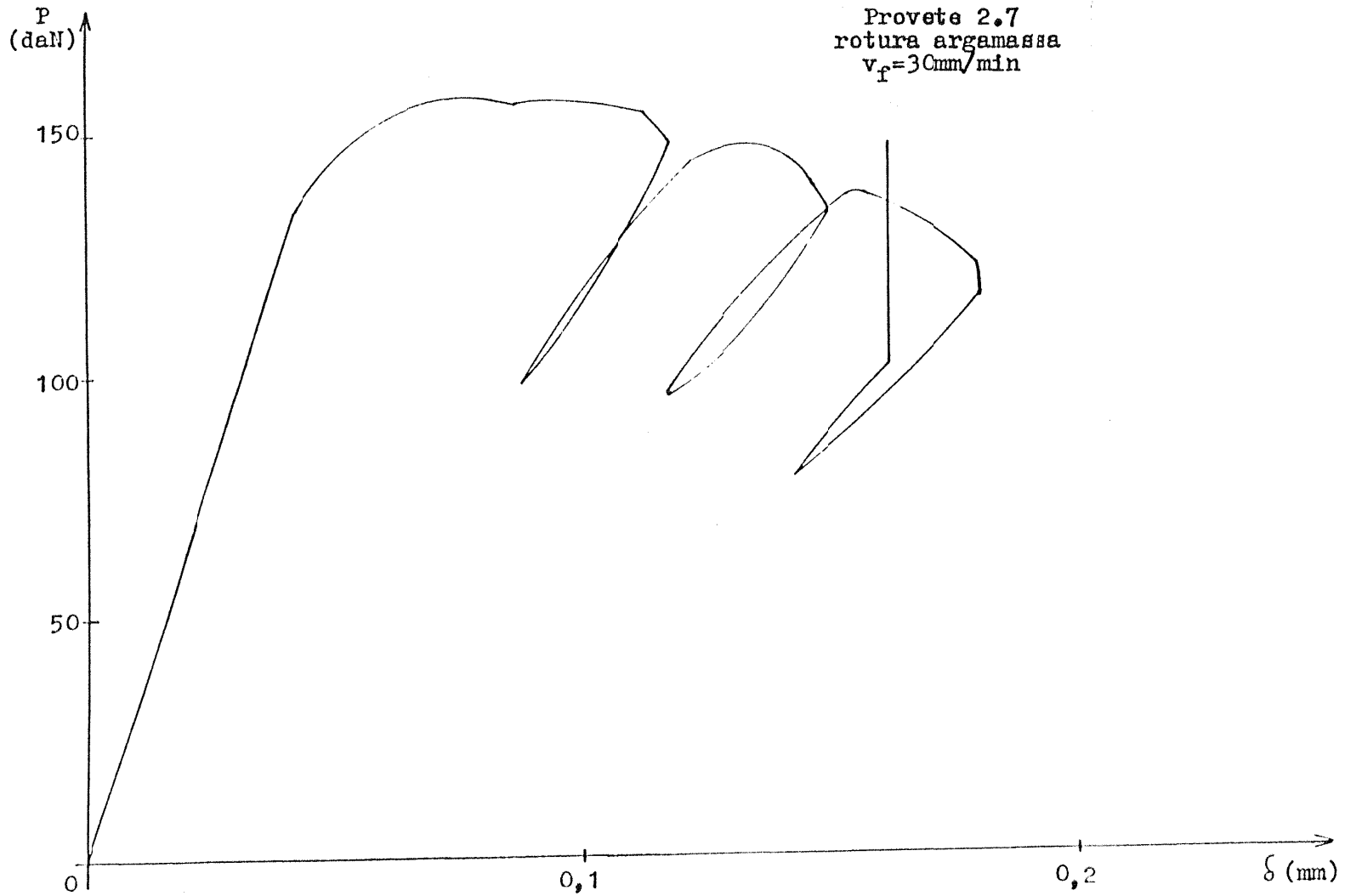
Provete 2.3
rotura mista argamassa
v_f=1mm/min




Provete 2.4
rotura mista adesiva
v_f=3mm/min
P
(daN)
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)


P
(daN)
Provete 2.5
rotura mista adesiva
v_f=10mm/min
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)


P
(daN)
Provete 2,6
rotura mista adesiva
v_f=15mm/min
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)


P
(daN)
150
100
50
0
0,1
0,2
δ (mm)
Provete 2.7
rotura argamassa
v_f=3Cmm/min