

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

ALEXANDRE ROCHA SALLES

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ELEMENTOS
ESTRUTURAIS MISTOS EM AÇO E BETÃO,
COLADOS E SUBMETIDOS A FLEXÃO**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

ALEXANDRE ROCHA SALLES

**AVALIAÇÃO DA DURABILIDADE DE ELEMENTOS
ESTRUTURAIS MISTOS EM AÇO E BETÃO,
COLADOS E SUBMETIDOS A FLEXÃO**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do(a)

Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar

Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente

Março de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Este espaço é dedicado não só a quem contribuiu para a realização desta dissertação, mas também a quem contribuiu de forma académica e/ou de forma particular com a ajuda e dedicação. Deixo aqui os mais sinceros agradecimentos:

Aos meus orientadores, Professor Doutor José Luís Barroso de Aguiar e Professora Doutora Maria Isabel Brito Valente, por terem confiado em meu potencial, e por todo o tempo, dedicação e conhecimento que me foi concedido.

Aos técnicos e engenheiros do Laboratório de Materiais de Construção e do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, com quem tive a honra de trabalhar.

E finalmente aos meus familiares, que sempre me apoiaram nas minhas decisões e me deram suporte e forças para que eu pudesse concluir meus desafios.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais, declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A construção, operação e demolição correspondem às atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente. O processo construtivo é fonte de geração de resíduos e poluentes, e juntamente com o consumo de energia, água e recursos naturais que ocorrem durante o ciclo de vida da construção, são fonte de impacto ambiental. A procura por um desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil está relacionada diretamente com a redução do impacto ambiental gerado pelo setor. Neste sentido, este estudo aborda o tema da sustentabilidade como eventual resultado de um melhor entendimento dos fenômenos associados à durabilidade dos materiais e dos componentes do sistema construtivo, possibilitando uma ampliação da sua vida útil. Através do aprofundamento do conhecimento em sistemas construtivos que utilizam elementos estruturais mistos em aço e betão, onde a ligação entre estes dois componentes seja obtida por colagem, pretende-se dar especial ênfase aos processos de degradação associados aos adesivos estruturais e à sua influência no comportamento global dos elementos mistos. Para tal, foram realizados ensaios de flexão em vigas mistas de betão e aço enformado a frio, de estruturas expostas a ambientes agressivos e também ensaios em estruturas idênticas que não tenham sofrido tais tipos de exposição, de modo a estabelecer comparações. A partir dos resultados experimentais, foi realizada uma modelação numérica com base no método dos elementos finitos (MEF), com o auxílio da utilização do *software* Atena 3D. Os modelos numéricos auxiliam, com custos mínimos, a identificar melhores soluções para uma determinada estrutura e orientam futuros ensaios experimentais. Podem também ser realizados como complemento à informação que é recolhida durante os ensaios experimentais.

Palavras-chave: Estruturas mistas; Durabilidade; Aderência; Adesivos estruturais; Perfis enformados a frio; Modelação numérica.

DURABILITY OF BONDED STEEL AND CONCRETE COMPOSITE STRUCTURAL ELEMENTS, IN BENDING

ABSTRACT

The construction, operation and demolition represent the most impacting human activity on the environment. The constructive process generates residues and pollutants, and also considering the consumption of energy, water and natural resources that occur over the service life of the construction are causers of environment impact. The demand for a sustainable development on the construction industry can be achieved by reducing the environmental impact of the sector. In this sense, this study addresses the sustainability theme as a final result from a better understanding of the phenomena associated with the safety of materials and components of the construction system, enabling an extension on their service life. Through the improvement of knowledge in construction systems that use the composite steel and concrete structures, considering that the connection between these two components is by bonding, is intended to give special emphasis to the degradation processes associated with structural adhesives and their influence on global behavior of composite elements. For this purpose, flexural tests were carried out on composite cold-formed steel and concrete beams, of structures that have been exposed to aggressive environments, comparing the results with tests of structures in normal conditions. From the experimental results, a numerical modeling was performed based on the finite element method (FEM), using the Atena 3D software. Numerical models assist, with minimal costs, to identify better solutions for a given structure and guide future experimental tests. The models can also be performed as a complement to the information that is collected during the experimental tests and using the results obtained as an approximation to reality.

Keywords: Composite structures; Durability; Adherence; Structural adhesives; Cold formed profiles; Numerical modelling.

ÍNDICE

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABELAS	XIV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. APLICAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO	5
1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
CAPÍTULO 2 METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	7
▪ TAREFA 1 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	8
▪ TAREFA 2 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO BETÃO	9
▪ TAREFA 3 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E AVALIAÇÃO DO ELEMENTO MISTO	10
▪ TAREFA 4 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS ADESIVOS.....	10
▪ TAREFA 5 – PRODUÇÃO DOS PROVETES.....	11
▪ TAREFA 6 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM AMBIENTES AGRESSIVOS	11
▪ TAREFA 7 – REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E TRATAMENTO DE RESULTADOS	12
▪ TAREFA 8 – DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO.....	13
▪ TAREFA 9 - ESCRITA E PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	14
CAPÍTULO 3 ESTADO DO CONHECIMENTO	15
3.1. DURABILIDADE.....	15
3.2. ESTRUTURAS MISTAS AÇO-BETÃO.....	19
3.3. ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO COLADAS	21

3.4.	ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO COLADAS SOB AÇÃO DE CARGA DE IMPACTO	24
3.5.	A UTILIZAÇÃO DE PERFIS ENFORMADOS A FRIO EM ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO	24
3.6.	REFORÇO ESTRUTURAL	26
3.6.1.	REFORÇO POR COLAGEM DE CHAPAS METÁLICAS	26
CAPÍTULO 4 TRABALHO EXPERIMENTAL.....		31
4.1.	DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	31
4.2.	COMPOSIÇÃO DO BETÃO	31
4.3.	PERFIL METÁLICO	35
4.4.	ADESIVOS.....	37
4.5.	EXECUÇÃO DOS ENSAIOS.....	38
4.6.	RESULTADOS.....	61
CAPÍTULO 5 MODELAÇÃO NUMÉRICA		67
5.1.	DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS	68
5.1.1.	VIGA DE BETÃO.....	68
5.1.2.	PERFIL METÁLICO	70
5.1.3.	ELEMENTOS DE APOIO E DISTRIBUIÇÃO DE CARGA.....	72
5.1.4.	ADESIVO ESTRUTURAL (COLA)	73
5.2.	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA.....	73
5.3.	DEFINIÇÃO DA MALHA	74
5.4.	CONDIÇÕES DE FRONTEIRA	76
5.5.	APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO	76
5.6.	PONTOS DE MONITORIZAÇÃO	77
5.7.	MÉTODO DE ANÁLISE E PASSOS DE INCREMENTO DE CARGA.....	78
5.8.	CALIBRAÇÃO DO MODELO	79
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS		83
6.1	CONCLUSÕES.....	83

6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO A1	90
	ANEXO A2	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma sobre a Metodologia Experimental	8
Figura 3.1 - Metodologia para a previsão do tempo de vida útil [17,18].....	18
Figura 3.2 – Elementos estruturais mistos aço-betão em um edifício [20]	19
Figura 3.3 – Elemento composto, mecanicamente conectado (a), colado (b) [4]	21
Figura 3.4 – Variação da resistência ao cisalhamento em função da espessura de colagem [4]	23
Figura 3.5 – Configuração de ensaio com respetiva curva resultante de escorregamento local [25,28].....	25
Figura 3.6 – Desenho esquemático de reforço estrutural utilizando colagem [15]	29
Figura 3.7 – Limpeza utilizando jato de água de alta pressão [15].....	30
Figura 3.8 – Colocação e colagem das chapas metálicas [15].....	30
Figura 4.1 – Desenho esquemático das vigas de betão.....	32
Figura 4.2 – Gráfico representativo das curvas granulométricas	35
Figura 4.3 – Desenho esquemático do provete.....	37
Figura 4.4 – Ensaio à compressão em cubos 150 × 150 × 150 mm, aos 7 dias.....	38
Figura 4.5 – Guia para execução de provetes.....	39
Figura 4.6 – Provetes após rotura ocorrida em ensaio de tração	40
Figura 4.7 – Gráficos Tensão x Deformação utilizados para obtenção dos valores de f_y e f_u ..	41
Figura 4.8 – Gráfico Tensão vs Deformação do ensaio à tração do aço	42
Figura 4.9 – Realização da colagem entre os elementos de aço e betão.....	43
Figura 4.10 – Imagem com alguns dos provetes executados	43
Figura 4.11 – Sistema automatizado para aplicação de ciclos de molhagem e secagem	44
Figura 4.12 – Provetes submetidos a ataque de cloreto (NaCl).....	45
Figura 4.13 – Provetes após 30 dias em ataque de cloreto (NaCl) após serem lavados	46

Figura 4.14 – Provetes após 60 dias em ataque de cloreto (NaCl) após serem lavados	46
Figura 4.15 – Provetes submetidos a ataque de sulfato (MgSO ₄)	47
Figura 4.16 – Provetes após 30 dias em ataque de sulfato (MgSO ₄).....	47
Figura 4.17 – Provetes após 60 dias em ataque de sulfato (MgSO ₄).....	48
Figura 4.18 – Provetes em estufa e durante ensaio a 40°C.....	48
Figura 4.19 – Desenho esquemático de posicionamento de apoios e carga	49
Figura 4.20 – Disposição dos LVDT's	50
Figura 4.21 – Ecrã do ensaio em execução, no software DynaTester.....	51
Figura 4.22 – Ensaio do Provede GB_REF_1	51
Figura 4.23 – Gráfico ilustrativo de simulação de rotina de ensaio.....	52
Figura 4.24 – Provede GB_REF_3 durante o ensaio	53
Figura 4.25 – Provede GB_REF_1 após rotura.....	54
Figura 4.26 – Provete de referência após rotura.....	54
Figura 4.27 – Provede submetido ao ataque de NaCl (60 dias) durante o ensaio	55
Figura 4.28 – Provede submetido ao ataque de NaCl (30 dias) após o ensaio	56
Figura 4.29 – Provete submetidos ao ataque de NaCl após o ensaio	56
Figura 4.30 – Provede submetido ao ataque de MgSO ₄ (60 dias) durante ensaio	57
Figura 4.31 – Provede submetido ao ataque de MgSO ₄ (30 dias) após o ensaio.....	57
Figura 4.32 – Provete submetidos ao ataque de MgSO ₄ após rotura	58
Figura 4.33 – Provede submetido a elevação de temperatura durante ensaio	59
Figura 4.34 – Provede submetido a elevação de temperatura (após rotura).....	59
Figura 4.35 – Provede GB_T80_1 após rotura.....	60
Figura 4.36 – Provete submetidos a elevação de temperatura após rotura.....	60
Figura 4.37 – Gráfico representativo de Força vs. Deslocamento no meio do vão e no apoio dos 3 provetes de referência	61
Figura 4.38 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de NaCl)	62

Figura 4.39 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$)	64
Figura 4.40 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos a aumento de temperatura)	65
Figura 5.1 – Propriedades do betão (Atena 3D).....	70
Figura 5.2 – Propriedades do material usado no perfil metálico (Atena 3D)	71
Figura 5.3 – Modelo com concentração de cargas de maneira indesejada na região da aplicação de carga	72
Figura 5.4 – Propriedades do material dos elementos de apoio (Atena 3D)	73
Figura 5.5 – Propriedades do material de interface (Atena 3D).....	73
Figura 5.6 – Geometria do modelo criado e geometria de provete utilizado nos ensaios	74
Figura 5.7 – Gráfico representativo de variação dos resultados com diferentes dimensões de malha.....	75
Figura 5.8 – Condições de apoio e fronteira impostas ao modelo criado	76
Figura 5.9 – Modelo com deformação excessiva na região dos apoios.....	77
Figura 5.10 – Parâmetros de solução do método de análise Newton-Rapshon	79
Figura 5.11 – Força vs. Deslocamento com diferentes propriedades (3D Interface)	80
Figura 5.12 – Força vs. Escorregamento com diferentes propriedades (3D Interface)	80
Figura 5.13 – Padrão de fendilhação de modelo com baixos valores de rigidez e resistência..	80
Figura 5.14 – Gráfico Força vs. Deslocamento no Apoio, com linha de tendência.....	81
Figura 5.15 – Gráfico comparativo entre curva Força vs. Deslocamento dos provetes experimentais de referência e modelo numérico.....	82
Figura A1.1 – Passos 1 e 2	90
Figura A1.2 – Passos 3, 4 e 5	91
Figura A1.3 – Passos 6 e 7	91
Figura A1.4 – Passo 8 e dosagem final	92
Figura A1.5 – Gráfico representativo da curva granulométrica	92

Figura A2.1 – Visão geral da ferramenta computacional.....	93
Figura A2.2 – Detalhamento das secções de Betão, Aço e Mista Aço-Betão	93
Figura A2.3 – Catálogo de perfis utilizados na comparação.....	94
Figura A2.4 – Resultado das análises plástica e elástica, com quadro comparativo entre perfis	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Requisitos mínimos para betões de acordo com classe de exposição [5].....	9
Tabela 3.1 – Valores mínimos para durabilidade de edifício e seus componentes ¹ em anos [14]	16
Tabela 3.2 – Comparação entre métodos construtivos.....	20
Tabela 3.3 – Parâmetros para escolha de cola [15].....	28
Tabela 4.1 – Propriedades e dosagem do cimento	32
Tabela 4.2 – Tabela caracterização agregados	33
Tabela 4.3 – Propriedades e dosagem do Superplastificante	33
Tabela 4.4 – Dosagem do betão	34
Tabela 4.5 - Percentual passado pelas peneiras	34
Tabela 4.6 – Geometria e secção bruta do perfil	36
Tabela 4.7 – Valores de referência dos provetes	36
Tabela 4.8 – Valores de momento fletor resistente obtidos com recurso à ferramenta computacional.....	36
Tabela 4.9 – Resultados do ensaio à compressão do betão aos 7 e 28 dias	39
Tabela 4.10 – Resultados do ensaio à tração do aço	41
Tabela 4.11 – Tabela comparativa para elementos submetidos a ambiente saturado de NaCl	62
Tabela 4.12 – Tabela comparativa para elementos submetidos ambiente saturado de MgSO ₄	63
Tabela 4.13 – Tabela comparativa para elementos submetidos temperaturas elevadas	65
Tabela 5.1 – Cálculo da carga total aplicada utilizando os pontos de monitorização dos apoios	78



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção, operação e demolição representam as atividades humanas com maior impacto sobre o meio ambiente [1]. O processo construtivo é fonte de geração de resíduos e também o consumo de energia, água e a geração de poluentes que ocorrem durante o ciclo de vida da construção são fonte de impacto ambiental. A procura por um desenvolvimento sustentável na indústria da construção civil está relacionada diretamente com a redução do impacto ambiental gerado pelo setor.

O presente trabalho aborda o tema da sustentabilidade como eventual resultado de um melhor entendimento dos fenômenos associados à durabilidade dos materiais e dos componentes do sistema construtivo, possibilitando uma ampliação da sua vida útil. O aumento da vida útil dos produtos contribui para a produtividade global e diminui as quantidades de resíduos. O aumento da vida útil dos produtos resulta numa diminuição de consumo de matérias primas e reduz a quantidade de resíduos de construção e demolição (incluindo atividades de manutenção) [2]. A durabilidade desempenha por isso uma função essencial na obtenção de uma construção sustentável [2].

O desenvolvimento da construção mista em aço e betão está intimamente ligado ao desenvolvimento das estruturas de betão armado e das estruturas em aço. Já no início do século XX, o betão foi inicialmente usado como material de revestimento, protegendo os perfis de aço contra o fogo e a corrosão. Embora o betão tivesse uma participação em termos estruturais, sua contribuição para a capacidade resistente do elemento estrutural era ignorada nos cálculos. Lajes maciças com vigas de aço revestidas foram bastante usadas nas décadas de 40 e 50. O desenvolvimento dos elementos de conexão contribuiu significativamente para acelerar os avanços associados à utilização de vigas mistas. Hoje, vigas e treliças mistas com conectores metálicos e lajes colaborantes com chapa de aço incorporada são intensamente usadas em edifícios de múltiplos pisos [3].

Avanços posteriores associados aos edifícios altos determinaram o modo como se utilizam os elementos mistos aço-betão. O betão é utilizado em paredes resistentes, do tipo *shear wall* e, os pilares mistos tubulares foram reconhecidos como sendo elementos estruturais eficientes para resistir às ações horizontais (vento), aumentando a rigidez lateral da estrutura. O uso desses elementos em estruturas usuais porticadas ofereceu vantagens em termos de economia e rapidez de execução. O objetivo desta combinação foi conciliar a rigidez do betão na resistência aos carregamentos laterais com o menor peso do aço e a sua capacidade para vencer vãos maiores [3].

Comparando-se com as condições correntes do betão armado, a construção em sistema misto aço-betão é competitiva para estruturas de vãos médios a elevados, caracterizando-se pela rapidez de execução e pela significativa redução do peso total da estrutura, propiciando assim fundações mais económicas [3].

1.1. ENQUADRAMENTO

A constante evolução da sociedade atual propicia desafios em todos os setores, incluindo o da construção civil onde se tem procurado a implementação de novos materiais, sistemas estruturais e tecnologias construtivas. Desta forma, há uma necessidade de avaliar os sistemas construtivos já existentes, bem como os materiais e suas formas de aplicação, para que possam ser implementadas melhorias.

A principal motivação deste trabalho é aprofundar o conhecimento em sistemas construtivos que utilizam elementos estruturais mistos, onde a ligação entre os componentes de aço e de betão é obtida por colagem. Pretende-se dar especial ênfase aos processos de degradação associados aos adesivos e à sua influência no comportamento global dos elementos mistos, a partir da utilização de 3 ambientes agressivos que pretendem simular situações desfavoráveis que podem afetar a ligação. O primeiro deles é o ataque de cloretos, que ocorre a partir da utilização de uma solução concentrada de cloreto de sódio (NaCl), sendo muito conhecido por ser um agente de degradação de elementos de aço a partir da corrosão, podendo desta forma interferir no comportamento global dos elementos. Um segundo ambiente, o ataque de sulfatos, é obtido a partir da utilização de solução concentrada de sulfato de magnésio (MgSO₄), muito conhecido por ser um agente de degradação dos elementos de betão a partir de reações expansivas,



podendo também interferir no comportamento global dos elementos. Um terceiro ambiente corresponde à exposição a elevadas temperaturas, onde se pretende avaliar o comportamento das resinas epoxídicas sob efeito de elevadas temperaturas, que podem afetar as suas propriedades.

O estudo bibliográfico desenvolvido mostrou que esta é uma área de conhecimento onde se encontram fenómenos cujo comportamento ainda não está bem estudado e consolidado. Esse levantamento também permitiu perceber que há um elevado potencial para o desenvolvimento de soluções melhores do que as que existem atualmente.

A utilização de ligações coladas pode surgir em substituição dos conectores de corte, apresentando várias vantagens, desde ganho de tempo no processo construtivo (utilizando elementos de betão pré-fabricados), manutenção de um estaleiro mais simples e limpo, com menor produção de resíduos, e ainda maior versatilidade em intervenções de reforço estrutural, onde a um elemento estrutural existente (geralmente em betão) pode ser adicionado um novo elemento (metálico), obtendo-se desta forma um elemento final misto, com maior resistência, evitando que a estrutura necessite de uma intervenção estrutural mais invasora. Destaca-se a versatilidade associada à aplicação de adesivos na ligação aço-betão, que pode ser utilizada como solução, tanto em novas construções (por exemplo, em elementos de betão pré-fabricado), como em reforço estrutural.

Em geral, as resinas epoxídicas apresentam bom comportamento quando expostas a ambientes agressivos, o que pode ser uma vantagem para este tipo de ligação. Pretende-se explorar a utilização deste tipo de resina na ligação colada.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo desta dissertação consiste no estudo do comportamento dos sistemas construtivos mistos, quando os componentes individuais de aço e de betão são ligados entre si com adesivos estruturais. Dá-se especial atenção a questões relacionadas com a durabilidade dos sistemas de ligação, quando estes são submetidos a ambientes agressivos e outras situações desfavoráveis, como a ocorrência de carregamentos cíclicos. Pretende-se definir e quantificar a degradação dos materiais e componentes utilizados, possibilitando um melhor

entendimento dos fenômenos envolvidos, de modo a que possam ser criadas soluções mais sustentáveis e favoráveis do ponto de vista da durabilidade das edificações.

O desenvolvimento do trabalho tem um enfoque mais específico no que diz respeito à avaliação da durabilidade dos elementos estruturais mistos em aço e betão colados, quando submetidos a ambientes agressivos e condições de carregamento desfavoráveis.

Em paralelo, procura-se avaliar o comportamento dos sistemas colados no âmbito do reforço estrutural, visando a sua aplicação em situações onde é necessária a recuperação do desempenho de projeto, e até mesmo o alcance de um desempenho superior ao planeado em projeto, dadas as eventuais necessidades de adaptação das edificações em função das diferentes formas e finalidades de ocupação.

Para alcançar esses objetivos foram realizados ensaios em laboratório, com subsequente recolha e tratamento de dados. Foram também desenvolvidos modelos numéricos representativos dos ensaios realizados, para os quais se fará uma calibração de parâmetros baseada nos resultados experimentais obtidos. Esses modelos foram utilizados em posteriores análises paramétricas que permitiram avaliar o comportamento da ligação em situações diferentes das que foram consideradas nos ensaios experimentais.

De forma sucinta, pode-se dizer que os objetivos deste trabalho consistem em:

- Apresentar os pressupostos associados ao projeto e à definição de elementos estruturais mistos em aço e betão, quando colados por resinas (epoxídicas e outras);
- Avaliar a resposta de resinas epoxídicas em elementos mistos de aço e betão colados, quando sujeitos a alterações físicas e químicas;
- Avaliar o comportamento experimental de elementos mistos de aço e betão colados, no que diz respeito à durabilidade quando submetidos a esforços de flexão;
- Avaliar o efeito da alteração da geometria e da composição dos elementos estruturais mistos de aço e betão do ponto de vista da durabilidade, com a finalidade de aplicar a solução construtiva não apenas em novas construções, mas sobretudo no contexto da reabilitação.

1.3. APLICAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

A utilização das estruturas mistas como solução construtiva é um tema amplamente discutido, que, se mostra consideravelmente vantajosa em diferentes situações.

Tendo em vista o notável crescimento da utilização deste tipo de solução construtiva, é natural que se abram diferentes campos de utilização, fazendo com que o sistema construtivo esteja em constante crescimento e evolução, podendo ser aplicado em situações distintas das que são tradicionalmente utilizadas.

Juntamente com a evolução do sistema construtivo, novos materiais e procedimentos são testados com a finalidade de viabilizar e otimizar a utilização do sistema.

Conforme será discutido no próximo capítulo, a utilização de colas estruturais (ou adesivos estruturais) pode ser vantajosa em diversas situações, nomeadamente em elementos estruturais mistos de aço e betão. A ideia de utilizar colas estruturais em estruturas mistas de aço e betão é o ponto de partida deste trabalho, o qual opta por estudar o comportamento das colas, sobretudo no que diz respeito à sua durabilidade.

Em estruturas mistas de aço e betão, as colas podem atuar como único elemento de ligação, ou seja, sem que haja qualquer outro elemento de ligação entre os componentes da estrutura mista. Podem ainda atuar como elemento de ligação complementar, quando se considera uma ligação realizada por conectores, como, por exemplo, os *stud bolts*.

A utilização de elementos estruturais em betão pré-fabricado e perfis de aço, e a utilização das colas como elemento de ligação pode ser em muitos casos uma excelente opção, minimizando consideravelmente o impacto ambiental gerado em obras com elementos estruturais em betão executados *in situ*. A durabilidade da conexão obtida por colagem ainda é uma área onde há muito trabalho a fazer, no âmbito da engenharia estrutural [4].

Aponta-se também para a possibilidade de utilização das colas quando há necessidade de intervenção em elementos já construídos. Neste caso, considera-se a execução de um reforço estrutural de uma edificação que sofreu uma diminuição do seu desempenho, ou ainda o reforço de uma edificação que tenha novas exigências no que diz respeito à sua capacidade resistente, podendo conferir a uma antiga edificação, novas possibilidades de utilização e ocupação. Em

ambos os casos, a busca por minimizar o impacto ambiental de uma demolição, partindo do princípio da reutilização são pontos positivos que devem ser considerados.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 8 capítulos, sendo estes apresentados sob a seguinte estrutura:

O Capítulo 1, Introdução, destina-se a apresentar, de forma breve, o sistema construtivo que será analisado, justificando a importância desta investigação e expondo os objetivos que deverão ser alcançados.

O Capítulo 2, Metodologia de Investigação, apresenta de forma sucinta a metodologia utilizada durante a elaboração desta dissertação, considerando o cumprimento de 9 tarefas descritas ao longo do capítulo.

O Capítulo 3, Estado de Conhecimento, é composto por uma revisão bibliográfica que apresenta os desafios do setor da construção perante a sustentabilidade e expõe as medidas que devem ser tomadas para que uma construção/estrutura se torne mais sustentável.

O Capítulo 4, Trabalho Experimental, expõe o trabalho experimental realizado, apresentando o planeamento, a preparação dos provetes, a execução dos ensaios e a análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em laboratório.

O Capítulo 5, Modelação Numérica, expõe a modelação da viga utilizada no trabalho experimental, durante o ensaio de flexão, e descreve os parâmetros atribuídos com base na calibração efetuada.

O Capítulo 6, Considerações Finais, apresenta considerações acerca dos principais resultados obtidos e indica desenvolvimentos futuros que possibilitem prosseguir a investigação relacionada com o sistema construtivo avaliado no presente estudo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

O presente trabalho pretende atingir uma melhor compreensão dos fenómenos associados à durabilidade das estruturas mistas de aço-betão coladas, com o objetivo de avaliar a viabilidade de utilizar esta solução construtiva no contexto da construção nova e no contexto da reabilitação. Para tal, será adotada uma metodologia experimental, com a realização de ensaios controlados realizados em laboratório e uma metodologia numérica, com desenvolvimento de modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF).

O estado do conhecimento apresentado descreve os principais aspetos relacionados com o tema desta investigação, principalmente no que diz respeito à durabilidade, aos materiais e ao sistema construtivo, em estruturas mistas.

A metodologia experimental adotada desenvolve-se em diferentes etapas, que foram planeadas com o intuito de analisar e estudar extensivamente o comportamento do elemento construtivo.

- Pesquisa bibliográfica;
- Definir um programa experimental dedicado ao estudo e desenvolvimento do betão;
- Definir um programa experimental dedicado ao estudo e avaliação do elemento misto;
- Definir um programa experimental dedicado ao estudo e avaliação do comportamento dos adesivos;
- Produção dos provetes;
- Estudo do comportamento em ambientes agressivos;
- Desenvolvimento dos ensaios e tratamento de resultados;
- Desenvolvimento de modelo numérico;
- Escrita e publicação dos resultados obtidos.

O fluxograma representado por meio da Figura 2.1 apresenta de forma esquemática o desenvolvimento da metodologia, apresentando a forma com que a metodologia experimental deverá ser seguida.

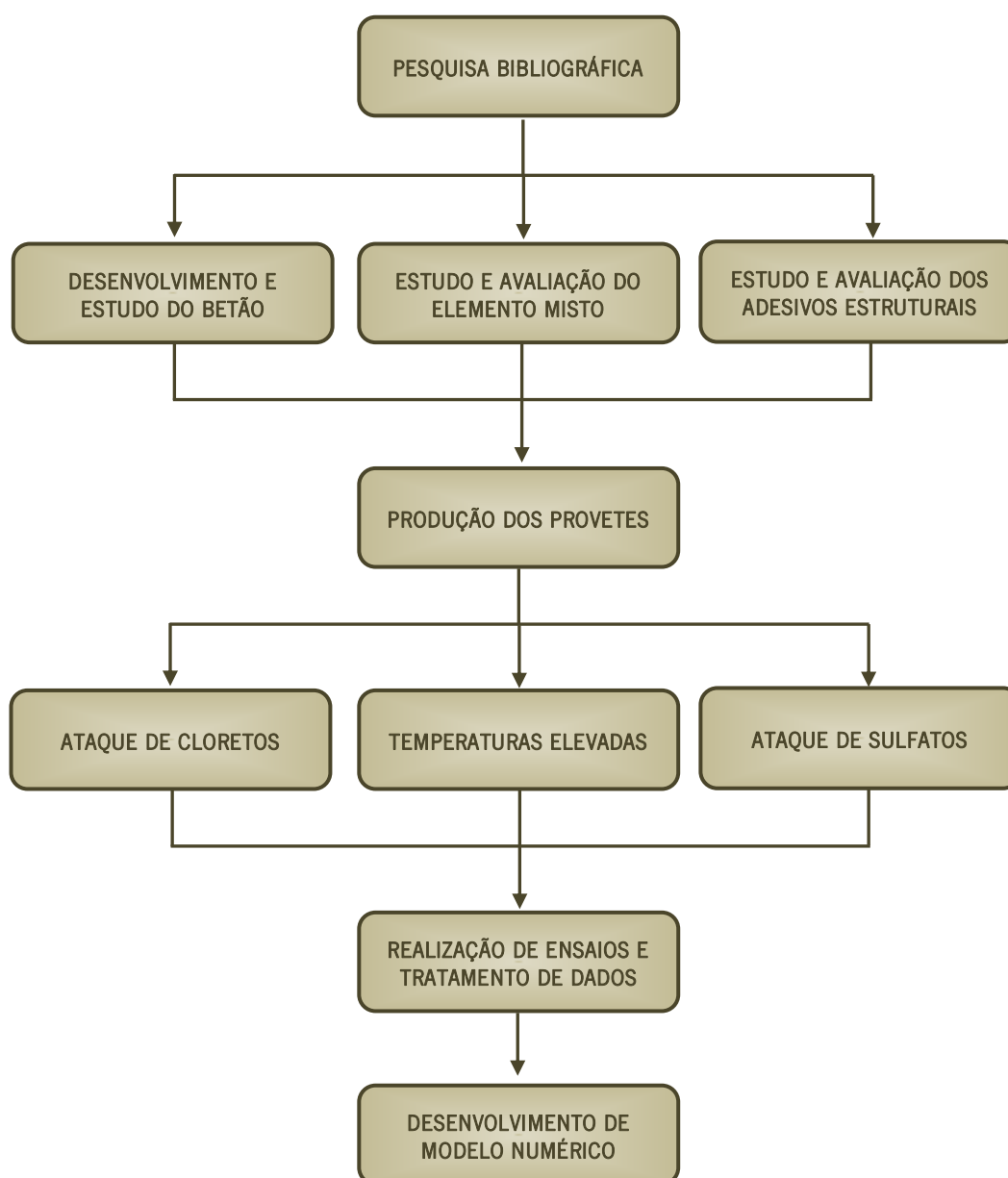


Figura 2.1 – Fluxograma sobre a Metodologia Experimental

Para o cumprimento da metodologia, considera-se a realização de tarefas descritas a seguir.

▪ TAREFA 1 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Como ponto de partida, é necessário atualizar o estado do conhecimento relacionado com os estudos já efetuados por outros investigadores no âmbito deste tema. Para tal, será realizada uma pesquisa bibliográfica relativa ao tema da dissertação, designadamente relativa a trabalhos

publicados em livros, artigos de jornais ou revistas, registos referentes a congressos, nacionais e internacionais, bem como outros trabalhos desenvolvidos em ambiente académico como dissertações de mestrado ou doutoramento;

▪ TAREFA 2 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO BETÃO

Definir a dosagem do betão a ser utilizado no fabrico dos provetes que serão ensaiados, respeitando as normas em vigor no que toca à exposição a que os elementos ficarão sujeitos, atentando às normas cabíveis, desde a NP EN 206-1 de 2007 [5], como outras normas complementares tal como a NP EN 12620 de 2010 [6], norma referente a utilização de agregados para betão, bem como as demais normas referente aos betões, e demais componentes, sempre considerando a finalidade dos parâmetros a serem mensurados por meio dos ensaios, tendo em conta a situação de exposição a ambientes agressivos, tal como referido pelo Quadro F.1 da NP EN 206-1 de 2007 [5], transcrito no que se apresenta na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Requisitos mínimos para betões de acordo com classe de exposição [5]

	Classes de exposição																	
	Sem risco de corrosão ou ataque	Corrosão induzida por										Ataque pelo gelo/degelo				Ambientes químicos agressivos		
		Carbonatação				Cloretos provenientes												
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	Da água do mar			De outras origens			XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Máxima razão A/C		0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Mínima classe de resistência	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Mínima dosagem de cimento (kg/m³)		260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Mínimo teor de ar (%)													4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a			
Outros requisitos												Agregados conformes com a EN 12620:2002 com suficiente resistência ao gelo/degelo				Cimento resistente aos sulfatos		

^a Se o betão não tiver ar incorporado, o seu desempenho deverá ser avaliado com um método de ensaio apropriado, tendo como referência um betão cuja resistência ao gelo/degelo, para a classe de exposição aplicável, se encontre estabelecida.

^b Quando o SO₂ conduzir às classes de exposição XA2 e XA3, é essencial utilizar cimento resistente aos sulfatos. Se o cimento estiver classificado quanto à resistência aos sulfatos, deverá ser utilizado cimento de moderada ou elevada resistência aos sulfatos na classe de exposição XA2 (e quando aplicável na XA1) e cimento de elevada resistência aos sulfatos na classe de exposição XA3

A dosagem do betão será estudada considerando o Método de Faury, através de ferramenta computacional onde as constantes e os valores exigidos pelas normas podem ser fixadas, e a ferramenta então trabalha a partir de uma análise de hipóteses, buscando encontrar um valor otimizado para a composição ideal, respeitando os procedimentos e valores indicados pela NP EN 206-1 de 2007 [5].

Quanto a produção, os procedimentos deverão ser igualmente balizados pela NP EN 206-1 de 2007 [5], sendo executada a mistura em betoneira, com devidos cuidados e precauções constantes na norma.

Já no que diz respeito a execução de estruturas em betão, a NP EN 13670-1 de 2007 [7] é responsável por ditar os procedimentos normativos referentes a execução de estruturas em betão, que deverão ser seguidos.

▪ **TAREFA 3 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E AVALIAÇÃO DO ELEMENTO MISTO**

Selecionar o tipo, a forma e as dimensões dos perfis metálicos e da secção de betão a serem utilizados na composição dos elementos mistos, sendo estes destinados a ensaios de flexão.

Para o cumprimento desta tarefa considera-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliar o comportamento da secção mista, de acordo com a NP EN 1994-1 de 2011 [8], que tem por finalidade realizar automaticamente a comparação entre secções mistas a partir da alteração da forma e das dimensões da secção de betão e do perfil metálico, considerando alguns dos inúmeros tipos de perfis enformados a frio existentes em catálogos de fabricantes, para tentar buscar formas e dimensões que fossem interessantes para os experimentos.

▪ **TAREFA 4 – DEFINIR UM PROGRAMA EXPERIMENTAL DEDICADO AO ESTUDO E AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS ADESIVOS**

Selecionar o adesivo estrutural com propriedades técnicas que atenda às necessidades do trabalho, e que será utilizado para realizar a colagem dos elementos em aço e betão;



A escolha da cola é uma questão muito delicada, e habitualmente acaba-se por na maioria das vezes optar por alguma cola à base de resina epoxídica, tendo em vista a existência de vasta literatura sobre esse tipo de adesivo, que exaltam seu adequado desempenho quando utilizada em uma vasta gama de produtos.

▪ **TAREFA 5 – PRODUÇÃO DOS PROVETES**

Produzir os provetes previstos nas tarefas 2, 3 e 4, bem como definir o *setup* de ensaio e o sistema de monitorização, e preparar a respetiva montagem;

▪ **TAREFA 6 – ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM AMBIENTES AGRESSIVOS**

Com o intuito de avaliar parâmetros relacionados à durabilidade, pretende-se a realização de ensaios de flexão, de modo a avaliar o comportamento da ligação colada e também o comportamento dos elementos misto aço-betão colado.

Nesta tarefa pretende-se que seja comparado o comportamento dos adesivos nas diversas situações, avaliando também o desempenho do betão e do aço, quando constituinte de um elemento misto em ambientes agressivos, a partir da utilização de três ambientes desfavoráveis, seguindo com análises e comparação com elementos que não estiveram na presença de nenhum destes ambientes.

- Ataque químico através de ensaios de envelhecimento acelerado na água do mar (ambiente com alta concentração de Cloreto de Sódio – NaCl): com o intuito de verificar a durabilidade das estruturas mistas de aço-betão quando na presença de um ambiente onde haja um excesso de cloreto de sódio (NaCl), um ambiente concentrado da solução será criado, seguindo procedimentos normativos do laboratório de materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde os elementos mistos de aço-betão serão submergidos e retirados de maneira cíclica, gerando um envelhecimento acelerado, para que possa ser obtido um resultado relativo a um ambiente com uma concentração razoável (tal como água do mar), por um longo período de exposição.
- Ataque químico de exposição ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$): de maneira equivalente ao ataque de cloretos, e com o intuito de verificar a durabilidade das estruturas mistas

de aço-betão quando expostas a ambientes onde haja presença de sulfato de magnésio ($MgSO_4$), os provetes serão expostos a um ambiente saturado, por meio da utilização de uma solução aquosa onde serão ciclicamente inseridos, simulando uma exposição, utilizando como base para a metodologia de teste ASTM C88-05 [9].

- Ataque físico através de elevação da temperatura, no que diz respeito ao comportamento diante de temperaturas elevadas, vários estudos já demonstram que este talvez seja um dos pontos críticos das estruturas mistas aço-betão, e ainda mais quando se considera a ligação entre os elementos realizada por resina epoxídica. Desta forma, para a obtenção de resultados relevantes no que diz respeito à durabilidade das estruturas mistas de aço-betão, estima-se a importância de análise do comportamento dos elementos diante da elevação da temperatura, e para tal pretende-se que sejam realizados ensaios em diferentes temperaturas, seguindo procedimentos normativos do laboratório de materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

▪ **TAREFA 7 – REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E TRATAMENTO DE RESULTADOS**

De forma a dar prosseguimento, esta tarefa consiste na execução de ensaios aos quais os elementos serão submetidos, após serem definidas todas as informações referentes aos provetes e parâmetros que são objeto da investigação.

A execução de ensaios de flexão, após serem definidas todas as informações referentes aos provetes e parâmetros que são objeto da investigação, conforme apresentado nas tarefas anteriores, além de um ensaio complementar para o betão quando executado *in situ*, através dos quais espera-se obter dados suficientes para o alcance do objetivo desta investigação.

- Ensaio de resistência à compressão do betão: com a finalidade de determinação da resistência à compressão dos elementos de betão executados, devem ser realizados ensaios, tendo em vista que tais resultados influenciam diretamente na escolha do perfil metálico (tarefa 4), e conseqüentemente no elemento misto aço-betão que será executado.

O ensaio de resistência à compressão é normalizado pela NP EN 12390 [10], que é acompanhada das outras partes da norma que esclarecem as propriedades (tais como forma e dimensões) e também procedimentos de execução e cura dos provetes.

- Ensaio de resistência à flexão: consiste na aplicação de uma carga crescente em determinado ponto ou pontos de uma barra biapoiada. Em geral, os ensaios ocorrem em três ou quatro pontos.

Simultaneamente, durante o ensaio são monitoradas as cargas aplicadas e a deformação da barra. O ensaio de flexão é caracterizado por trabalhar apenas no regime elástico de deformação até a fratura ou deformação de 5% do provete. Por isso, esse ensaio é amplamente aplicado para materiais frágeis e duros, por exemplo, ferro fundido, aços ferramenta, compósitos e cerâmicos estruturais, mas também pode ser utilizado para polímeros. Através desse ensaio é possível conhecer o comportamento do material e estudar os efeitos da geometria do seu perfil quando submetido a esforços de flexão, muito comuns em aplicações industriais e estruturais. As principais propriedades que podem ser obtidas são a deflexão máxima de rotura, os módulos de rotura, elasticidade, resiliência e tenacidade.

A partir dos resultados, pode-se obter a curva de tensão-deformação do material. Durante o ensaio ocorre um complexo estado de tensões no interior do provete, por isso, algumas hipóteses são assumidas. Tratando-se de elementos metálicos, maioria das equações são previstas nas normas ASTM E812 e ASTM E855, e para elementos de betão, nas normas ASTM C78 e ASTM C293, principalmente para provete de seção transversal circular e retangular. Desse modo, é possível calcular a deformação máxima do ensaio, e em seguida os módulos relacionados às propriedades mecânicas.

Durante esta tarefa será ainda realizada a coleta e análise dos dados, para que seja dado prosseguimento com o tratamento destes dados, e sequente escrita e publicação dos mesmos, na tarefa 9.

▪ **TAREFA 8 – DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO**

Utilização uma metodologia numérica, com desenvolvimento e calibração de modelos numéricos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), tendo por base os ensaios realizados, com o

objetivo de descrever e simular o comportamento da estrutura, para assim obter respostas do comportamento necessários para o estudo. Para tal será utilizado o *software* Atena 3D.

▪ **TAREFA 9 - ESCRITA E PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

Redação da dissertação, tendo em consideração os resultados obtidos em cada uma das tarefas descritas anteriormente.

CAPÍTULO 3

ESTADO DO CONHECIMENTO

3.1. DURABILIDADE

Numa sociedade que cada vez se preocupa mais com a sustentabilidade e com boas práticas de construção, a durabilidade adquire um papel cada vez mais importante. A utilização de soluções construtivas com valências do ponto de vista da sustentabilidade, seja pelo seu alto desempenho com racionamento de materiais, ou pela sua capacidade de resistir às adversidades a que pode estar exposta, é sem dúvida uma área de intervenção importante e apetecida tanto pela sociedade quanto pela indústria, que cada vez mais buscam por soluções mais sustentáveis [11].

Devido a um conjunto de fatores, nos quais se incluem a falta de conhecimento sobre as condições em que a estrutura ficará exposta, inadequadas especificações e má interpretação das normas técnicas, há um aparecimento ainda maior de problemas de durabilidade [12].

Considerando que materiais mais duráveis conduzem a menores ações de reabilitação, conseqüentemente originando menores consumos de matéria prima, energia e produção de resíduos, pode-se dizer que a durabilidade dos materiais de construção encontra-se diretamente relacionada com a sustentabilidade dos mesmos, sendo a consequência da combinação entre o ambiente, as condições de uso, de operação e manutenção, e a estrutura. Ou seja, dependendo da forma de utilização, a estrutura pode apresentar diferentes comportamentos, resultando em variação da durabilidade ao longo do tempo [12].

De acordo com Cunha [11], por definição, a durabilidade de um material é a capacidade de suportar o desgaste ou deterioração, ou ainda, na engenharia civil, a vida útil da construção (tempo de serviço). Até recentemente, existia uma suposição errada de que um material mais resistente, seria por consequência um material mais durável. Portanto, os desenvolvimentos tecnológicos dos materiais de construção concentraram-se em obter materiais cada vez mais resistentes, em vez de ter o foco em materiais que entreguem um maior tempo de serviço.

A durabilidade, segundo a NBR 15575-1 de 2013 [13], norma brasileira sobre desempenho de edificações habitacionais, é definida como a capacidade de desempenhar sua função ao longo do tempo, considerando uso e manutenção adequada. No item 4.4 da referida norma, nota-se que dentre as exigências do usuário, a durabilidade é mais um dos fatores que estão diretamente relacionados à sustentabilidade, guiada pela busca de utilização de soluções mais duráveis, que miram para uma maior racionalização de materiais, vantajosa, sobretudo a partir da menor utilização de recursos provenientes do meio ambiente.

A norma ISO 15686-1 de 2000 [14] define durabilidade como *“capacidade do edifício ou seus elementos de desempenhar as funções requeridas durante um determinado período de tempo sobre influência dos agentes atuantes em serviço”*. Ainda de acordo com a norma, a Tabela 3.1 apresenta os valores mínimos no que concerne a durabilidade de edifícios e seus componentes.

Tabela 3.1 – Valores mínimos para durabilidade de edifício e seus componentes¹ em anos [14]

Vida de projeto do edifício	Elementos inacessíveis ou estruturais	Elementos cuja substituição é difícil ou dispendiosa	Elementos substituíveis Instalações e equipamentos	Instalações e equipamentos
Ilimitada ²	Ilimitada ²	100	40	25
150	150	100	40	25
100	100	100	40	25
60	60	60	40	25
25	25	25	25	25
15	15	15	15	15
10	10	10	10	10

¹Alguns dos elementos de fácil substituição (pintura de paredes exteriores) poderão ter uma durabilidade inferior – 3 a 6 anos
²A vida ilimitada deve ser utilizada apenas em alguns casos porque reduz significativamente as opções de projeto

A durabilidade de uma construção é representada por valores de vida útil (VU), que pretendem indicar o intervalo de tempo em que a construção é capaz de desempenhar as funções que lhes estão destinadas em determinado contexto. Representando as condições que influenciam o ciclo de vida das construções, o contexto é caracterizado pelas decisões tomadas em projeto, para as fases de construção e utilização, e pela perda de desempenho provocada pela envolvente, onde se inserem as variáveis deste problema após a implantação do edifício [15,16].

Para chegarmos a um valor estimado de vida útil de um determinado elemento de construção civil, sob determinadas condições, a norma ISO 15686-1 propõe uma metodologia denominada Método Fatorial [14].

▪ MÉTODO FATORIAL

Partindo de uma duração da vida útil de referência, esperada em condições padrão, obtém-se uma estimativa da vida útil para as condições particulares pretendidas através da multiplicação da vida útil de referência por uma série de fatores relacionados com diversos aspetos determinantes para a durabilidade [15,16].

Os fatores modificadores a considerar são os seguintes:

- Fator A – Qualidade do produto de construção (A);
- Fator B – Nível de qualidade do projeto (B);
- Fator C – Nível de qualidade da execução (C);
- Fator D – Características do ambiente interior (D);
- Fator E – Características do ambiente exterior (E);
- Fator F – Características do uso (F);
- Fator G – Nível de manutenção (G).

O método para estimar a vida útil de produtos da construção expressa-se pela equação (3.1),

$$VUE = VUR \times A \times B \times C \times D \times E \times F \times G \quad (3.1)$$

onde,

VUE é a Vida útil estimada

VUR é a Vida útil de referência

Os fatores A, B e C estão relacionados com as características inerentes aos elementos construtivos. O processo de projeto é responsável por até 50% das deficiências no processo construtivo. Como a fase de projeto se encontra no início deste processo, as deficiências desta fase tendem a manter-se durante todo o processo e a provocar outras deficiências nas fases seguintes. Sendo os fatores D e E relacionados com condições ambientais, interior e exterior respetivamente, responsáveis por constituírem um dos principais agentes de degradação dos edifícios. Já os fatores F e G, relacionados com condições de operação/manutenção, têm protagonismo crescente à medida que o edifício envelhece. Os fatores corretivos do método fatorial apresentam, tipicamente, valores compreendidos entre 0,8 e 1,2 [15,16].

Sobre a determinação do valor a ser considerado para a vida útil de referência, esta pode ser obtida, de modo geral, de três formas [17].

- Dados fornecidos pelo fabricante ou através de resultados obtidos por um laboratório de ensaios;
- Dados de experiências anteriores ou observações de construções similares ou que se encontram em condições similares;
- Informação recolhida em bibliografia reconhecida e relacionada com o tema da durabilidade.

Sempre que possível o valor da vida útil de referência deverá ser obtido através de uma metodologia de previsão, como a apresentada anteriormente, considerando ainda que deverão ser consideradas as condições ambientais próximas ou comparáveis com as especificações da situação a estimar. Assim, os fatores a adotar na estimativa serão o mais próximo possível da unidade, minimizando os eventuais erros introduzidos pelo método [17].

Quando o valor não pode ser obtido através da metodologia de previsão, pode ser obtida a partir de uma metodologia focada na possibilidade de previsão do tempo de vida útil de um produto específico através de ensaios, conforme apresentado no fluxograma representado na Figura 3.1.

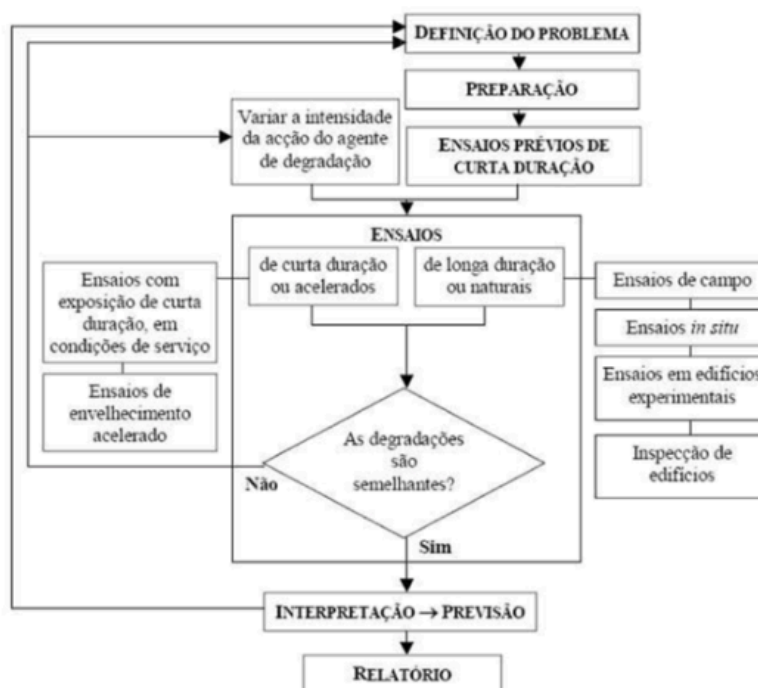


Figura 3.1 - Metodologia para a previsão do tempo de vida útil [17,18]

3.2. ESTRUTURAS MISTAS AÇO-BETÃO

É bem reconhecido que o aço tem alta resistência à tração e o betão tem alta resistência à compressão. Os dois componentes atuam como uma unidade integrada, apesar de suas diferenças físicas e comportamentos mecânicos. A estrutura mista é mais rígida e mais forte do que se o aço e o betão atuassem sozinhos em uma estrutura não mista [19].

As estruturas de aço e de betão vêm sendo intensivamente utilizadas na construção civil em todo o mundo há centenas de anos. A partir da década de 60, os sistemas mistos aço-betão ganharam corpo, com o desenvolvimento de métodos e disposições construtivas que garantem o funcionamento conjunto desses dois materiais, ampliando de forma considerável as opções de projeto e construção.

Regulamentado pela NP EN 1994-1 de 2011 [8], compreende-se por estrutura mista aço-betão aquela no qual um perfil de aço (laminado, soldado ou enformado a frio) trabalha em conjunto com o betão (geralmente armado), formando um pilar misto, uma viga mista, uma laje mista ou uma ligação mista (Figura 3.2).

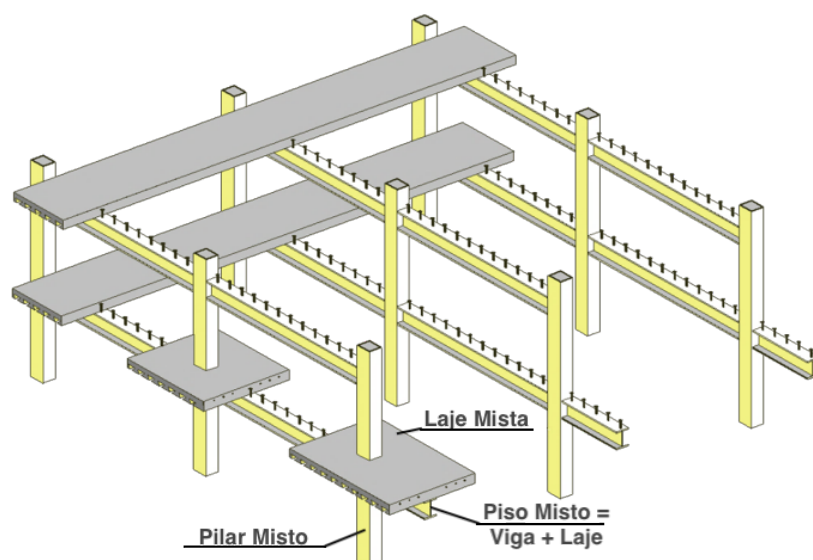


Figura 3.2 – Elementos estruturais mistos aço-betão em um edifício [20]

A combinação de perfis de aço e betão visa aproveitar as vantagens de cada material, tanto em termos estruturais como construtivos, bem como apontado na Tabela 3.2 que apresenta a comparação entre métodos construtivos

Tabela 3.2 – Comparação entre métodos construtivos

Construção convencional em betão armado	Construção convencional em aço	Construção mista aço-betão
+ Liberdade na forma	+ Relação entre resistência/peso	+ Elevada capacidade resistente
+ Facilidade de execução (sem trabalhadores especializados)	+ Pré-fabricação	+ Rigidez
+ Melhor comportamento térmico	+ Precisão	+ Capacidade de redistribuição plástica dos esforços
- Longo tempo de execução	- Fraca resistência ao fogo	+ Versatilidade
- Sensibilidade a esforços de tração	- Necessidade de trabalhadores especializados	

A construção mista em edifícios apresenta vantagens que se relacionam com diversos aspetos, dentre os quais se pode destacar:

- **Economia:** redução da altura total do edifício; maiores vãos para mesma altura dos elementos; maior espaçamento entre os pilares; mais pisos para uma mesma altura total do edifício.
- **Arquitetura:** maior versatilidade por apresentar vãos maiores, lajes mais finas, pilares mais esbeltos;
- **Funcionalidade:** o betão confere ao aço uma maior capacidade resistente ao fogo;
- **Flexibilidade:** estruturas adaptáveis que podem ser alteradas no decorrer da vida do edifício; possibilidade de incluir equipamentos e condutas nos pavimentos, tetos ou paredes;
- **Execução:** dispensa de cofragens; associação à pré-fabricação; maior agilidade na construção; menores custos de financiamento; utilização do edifício mais cedo.

As construções compostas de aço-betão têm inúmeras vantagens sobre construções não compostas, como maior resistência em relação ao peso, maior resistência à flexão e rigidez, mais rápida e mais flexível construção, facilidade na adaptação e reparo, maior durabilidade e melhor estética [4]

3.3. ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO COLADAS

A conexão entre aço e betão é geralmente assegurada por conectores de cisalhamento. Esses conectores devem ser capazes de resistir simultaneamente o esforço de cisalhamento entre os dois materiais e o esforço de separação entre o aço e o betão. Além disso, os conectores devem garantir que o esforço seja transferido entre os elementos de aço e betão. No entanto, esse tipo de conexão tem desvantagens – por exemplo a transmissão de tensões, que não são uniformes ou contínuas.

Em estruturas mistas, o uso de adesivos estruturais como elemento de ligação entre os componentes de aço e de betão tem sido discutido por vários autores. Uma das vantagens deste método é que o adesivo possibilita a transferência contínua do esforço entre o aço e o betão.

Convencionalmente utilizados, os conectores mecânicos causam concentração de tensões e têm pouca resistência à fadiga [4]. Outra falha dessas conexões é a incapacidade de fornecer um alto grau de interação, além disso, a maior densidade de conectores mecânicos poder prejudicar o lançamento do betão. A Figura 3.3 mostra uma vista esquemática de um conector mecânico em um elemento misto de aço-betão, em comparação com um elemento misto de aço-betão colado.

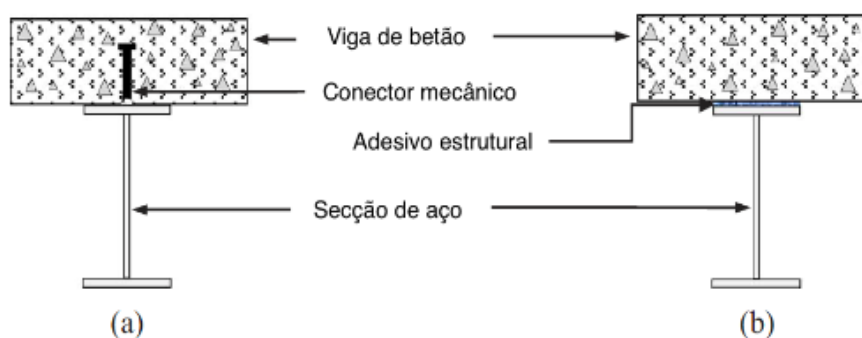


Figura 3.3 – Elemento composto, mecanicamente conectado (a), colado (b) [4]

Vários aprimoramentos nos adesivos estruturais existentes, em conjunto com o desenvolvimento de novos adesivos aumentaram sua aplicabilidade em várias áreas, como o reforço de estruturas existentes e conexões estruturais. Em comparação com os conectores mecânicos convencionais, os adesivos estruturais oferecem maior homogeneidade na distribuição de tensões, juntamente com uma cofragem reduzida, velocidade de construção acelerada, qualidade garantida e melhoria da fadiga de vida dos membros. Adesivos estruturais também podem ser usados para

unir membros com elementos transversais finos. Eles atuam como materiais de ligação e fornecem melhor resistência à corrosão e percolação de água. Devido a estas vantagens, os adesivos são usados para a ligação de partes similares e dissimilares no setor aeroespacial, automotivo, marítimo e de construção civil [4].

De acordo com Berthet et al. [19] investigações para encontrar outros métodos para unir aço e betão foram realizadas por vários laboratórios desde 1962 e, para avaliar o comportamento de estruturas mistas de aço-betão coladas, três tipos de sistemas compostos de aço-betão foram analisados. No primeiro sistema, a laje de betão foi despejada sobre a superfície da viga de aço, onde agregados foram então depositados na resina epoxidica. O segundo sistema consiste em conectar uma laje de betão pré-fabricada com uma viga de aço, utilizando resina fresca. No terceiro sistema, o betão foi despejado diretamente sobre a resina fresca, que cobria a superfície do aço. Os resultados mostraram que o primeiro sistema exibe uma grande deformação, quando comparado aos outros, o segundo sistema é o menos resistente e o terceiro sistema é o mais resistente, porém com o comportamento mais frágil [19].

De acordo com Barnes et al. [21], após estudo sobre a transferência de esforço através da colagem em um elemento misto de aço-betão, pode-se concluir que:

- A tensão de cisalhamento em uma junta adesiva de aço-betão é distribuída exponencialmente, tendo pico junto do carregamento final do elemento.
- O aumento na espessura da cola ou adesivo leva a uma redução geral nos níveis de pico de estresse e um aumento na capacidade resistente.

Ainda de acordo com Barnes et al. [21], uma análise de elementos finitos não-lineares bidimensionais de provetes de aço-betão colados produziram um modelo realista sobre o qual basear o projeto, tanto em termos de níveis de tensão quanto a comprimentos de ancoragem. Com um adesivo com espessura de 1 mm a distribuição de tensão de cisalhamento a partir da análise de elementos finitos mais se assemelhava aos resultados experimentais do que uma análise teórica baseada no método de Volkersen [22]. No entanto, com camadas adesivas mais grossas (3 e 5 mm), ambas as análises, o método de Volkersen [22] e a análise de elementos finitos, forneceram distribuições de tensão de cisalhamento semelhante. Ambos os métodos de análise são aplicáveis em níveis de carga mais baixos, onde o colapso do betão não está presente [21].

Para as estruturas mistas de aço-betão coladas, a força e qualidade da estrutura depende principalmente da resistência de aderência. É nítido que um desempenho adesivo mínimo da interface aço-betão é necessário para assegurar o comportamento da estrutura de maneira conjunta.[19].

Para tentar entender o comportamento mecânico de um elemento misto de aço-betão conectado por diferentes tipos de conexões, Berthet et al. [19] sugere a utilização do método de teste *push-out*.

Para entender a ligação física de interfaces compostas e a viabilidade de conexão composta por adesivo, autores têm realizado investigações experimentais relacionando a resistência ao cisalhamento com mudança na espessura da camada de ligação, tal como apresentado no gráfico da Figura 3.4 [4,23].

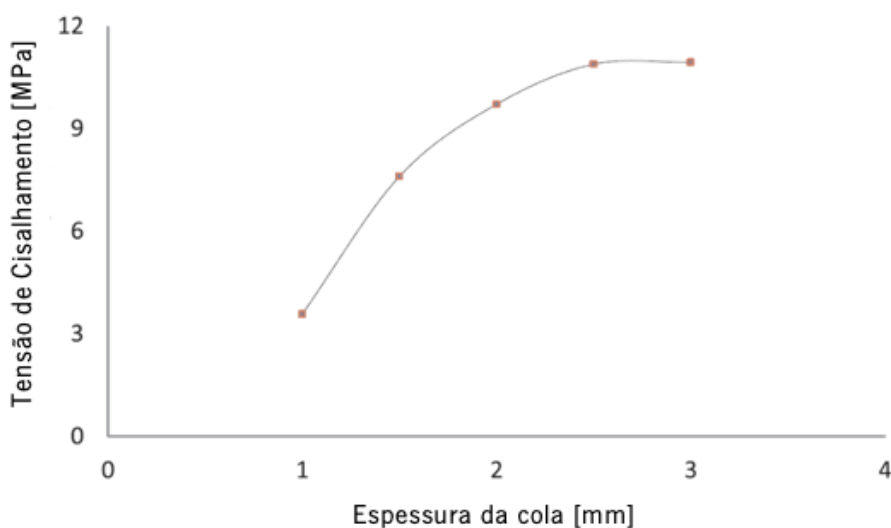


Figura 3.4 – Variação da resistência ao cisalhamento em função da espessura de colagem [4]

Além da espessura, a geometria de ligação da interface conectada e o tipo de conexão geral têm uma grande influência na resistência de união. A intensidade do estresse pode ser reduzida pela seleção cuidadosa da posição e largura da linha de ligação na interface conectada. Uma relação de largura e comprimento de ligação de cerca de 2,4 ou 0,4 leva a uma alta resistência ao cisalhamento [4].

3.4. ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO COLADAS SOB AÇÃO DE CARGA DE IMPACTO

Com a intenção de avaliar a diferença do comportamento entre elementos mistos de aço-betão conectados mecanicamente e colados, P. Kumar [24] realizou uma comparação qualitativa do comportamento de conexões compostas de aço-betão conectadas e coladas com adesivo sob carga de impacto.

Para isso, os elementos mistos de aço-betão foram submetidos ao teste de impacto de queda de peso. O número de golpes necessários para inicialização das fissuras e falha final (falha de manutenção no caso da conexão por pino) foram observados [24].

Verificou-se que a ligação colada pode resistir comparativamente maior número (duas vezes) de golpes para início de rotura, mas, o número de golpes necessários para a falha final foi relativamente menor. O elemento misto colado mostrou uma falha no betão perto da interface betão / adesivo, enquanto que a amostra mecanicamente conectada falhou de forma dúctil, devido ao esmagamento do betão em provetes compósitos perto dos pinos [24].

3.5. A UTILIZAÇÃO DE PERFIS ENFORMADOS A FRIO EM ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO-BETÃO

A ação composta em sistemas aço-betão depende de um mecanismo de transferência de cisalhamento efetivo entre os dois materiais. Tal mecanismo para superfícies de aço lisas dentro do betão será limitado ao comportamento de aderência escorregamento nas interfaces aço / betão [25].

Embora uma extensiva gama de trabalhos científicos possa ser encontrada na literatura sobre o comportamento da adesão entre barras de aço nervuradas, ou folhas de polímero reforçado com fibras (FRP) e o betão, muito pouco se pode encontrar sobre a adesão de chapas de aço planas. No entanto, com o recente crescimento da utilização de perfis de aço enformados a frio em construções compostas [25–27], tornou-se necessário estudar o comportamento de perfis de aço enformados a frio (de superfície lisa) incorporados no betão [25].

Majdi et al. [25] apresentam uma nova metodologia para análise do comportamento de aderência local entre elementos de aço galvanizado e enformado a frio embebido em betão, com

base em um procedimento inovador, através de equações matemáticas e pontos selecionados a partir das curvas experimentais de escorregamento global foi desenvolvido um modelo local de ligação-escorregamento bilinear que representasse o comportamento da ligação-escorregamento Figura 3.5. Por ajuste de curva, equações empíricas são propostas para determinar os parâmetros do modelo sugerido com base na resistência à compressão do betão. Para validação do modelo proposto foram explorados dois métodos: (1) comparação dos resultados de equações analíticas com resultados de testes, (2) comparação dos resultados de modelagem de elementos finitos com resultados de testes. De acordo com os resultados, um excelente comportamento foi observado em ambos os casos de validação.

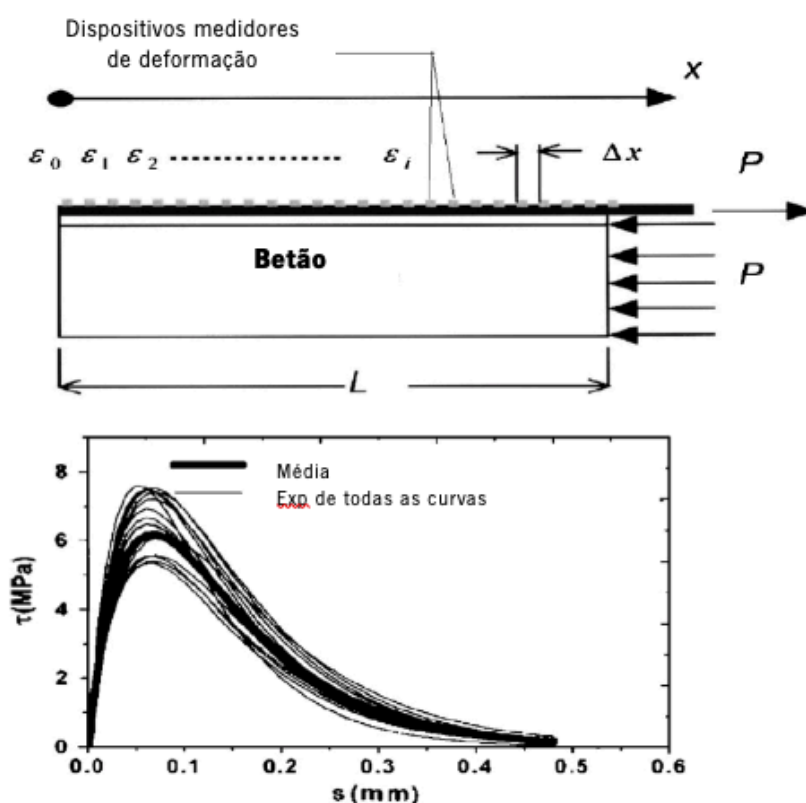


Figura 3.5 – Configuração de ensaio com respectiva curva resultante de escorregamento local [25,28]

Esta curva carga \times deslocamento pode ser referida como "*Global Bond-slip Behavior*", e é utilizada para prever o comportamento do escorregamento local através de procedimento analítico [25].

A partir das considerações e resultados apresentados por Majdi et al. [25], sobretudo da metodologia desenvolvida, nota-se a necessidade de uma metodologia para situações em que

existe a utilização de resina epoxídica como elemento de ligação (cola) entre os elementos de aço enformado a frio e betão.

3.6. REFORÇO ESTRUTURAL

Não são raros os momentos em que uma estrutura necessita de uma intervenção estrutural, com a finalidade de reforçar a estrutura, seja para recuperar sua capacidade funcional, ou mesmo para que seja adquirida uma capacidade além daquela para a qual a estrutura foi projetada.

Para tal, os principais tipos de intervenção de reforço estrutural podem ser classificados em 5 tipos [15].

- Reforço por Adição de Armaduras Exteriores (Metálicas, CFRP, GFRP, AFRP);
- Reforço com Encamisamento (Armaduras e Betão/Argamassas);
- Pré-esforço Exterior (Cabos de Aço, Laminados de Carbono);
- Substituição por Novos Elementos;
- Adição de Novos Elementos.

Sendo o foco deste trabalho a durabilidade das estruturas mistas de aço-betão coladas, considerando a motivação deste estudo, que leva em conta, além de outros, a possibilidade de utilização de perfis metálicos colados, agindo como reforço estrutural em estruturas de betão, serão realizados alguns apontamentos sobre a execução de reforço estrutural por adição de armaduras exteriores, mais especificamente por colagem de chapas ou perfis metálicos.

3.6.1. REFORÇO POR COLAGEM DE CHAPAS METÁLICAS

Estruturas de betão existentes podem exigir o reforço ou enrijecimento, a fim de aumentar a sua capacidade resistente à flexão ou cisalhamento, ou mesmo para controlar desvios e fissuras. Um método para fornecer este ganho de capacidade é colar adesivamente chapas de aço junto da superfície do elemento de betão. A técnica de utilização de aço ligado externamente tem sido utilizada mundialmente há mais de 50 anos [21].

Algumas das vantagens do reforço por colagem de chapas externas sobre outros métodos incluem, dentre outros, o efeito mínimo sobre o vão livre, baixo custo, facilidade de manutenção e capacidade para fortalecer parte da estrutura enquanto ainda está em uso [21].

No que diz respeito a reparação de estruturas de betão, a NP EN 1504-4 de 2006 [29] é responsável por instruir e regulamentar procedimentos para a realização de intervenções com finalidade de reforço e reparação por colagem estrutural.

▪ **PRINCIPAIS ASPETOS**

Sobre o reforço por colagem de chapas metálicas, Costa [15] considera como alguns dos principais aspetos a serem apontados:

- Rapidez de execução e interferência mínima na utilização da estrutura;
- Suscetibilidade à exposição solar, problemas de fluência para cargas permanentes, mau comportamento ao fogo e à fadiga;
- Requer elevado controlo de qualidade: preparação de superfícies, características da resina, execução dos trabalhos, etc.;
- A espessura das chapas varia, em geral, de 3 a 10mm;
- O aço deve trabalhar a baixas tensões de forma a não serem necessárias deformações excessivas para mobilizar a sua capacidade resistente \Rightarrow Fe 360;
- A colagem é feita com resina epoxídica aplicada por injeção ou por espatulamento;
- As chapas devem ser protegidas contra a corrosão e a ação do fogo.

▪ **CAMPO DE APLICAÇÃO**

Para a tomada de decisão sobre a escolha do tipo de reforço a ser utilizado, de acordo com Costa [15], conta com o seguinte campo de aplicação.

- Quando há deficiência de armaduras;
- O betão é de boa/média qualidade;
- É inconveniente o aumento das secções;

- O reforço é moderado;
- Reforço em vigas ao esforço transversal, e em vigas e lajes ao momento fletor;
- Mais adequado para ações monotônicas;
- Não se aplica no reforço à compressão;
- Pouco eficaz para o reforço à ação sísmica.

▪ ESCOLHA DA COLA

A escolha da cola é um fator essencial para o sucesso da intervenção, e deve seguir parâmetros para adequar a utilização correta em cada situação.

Para Costa [15], para uma adequada utilização de colas em reforços estruturais, as mesmas devem apresentar parâmetros que estejam de acordo com as características médias apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Parâmetros para escolha de cola [15]

CARACTERÍSTICAS MÉDIAS DAS COLAS	
Resistência à Compressão	80 a 120 MPa
Resistência à Tração	40 a 55 MPa
Resistência à tração por Flexão	25 a 35 MPa
Resistência ao Corte	12 a 20 MPa
Adesão Aço-Cola	1 a 6 MPa
Adesão Betão-Cola	2 a 8 MPa
Módulo de Elasticidade	2 a 17 GPa
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0.27
Coefficiente de Fluência para uma compressão de 40 MPa	12
Espessura	$e \leq 1$ a 3 mm

▪ EXECUÇÃO

A execução de reforço estrutural por colagem de chapas metálicas pode acontecer tanto considerando a cola como sendo a única forma de ligação, quanto sendo utilizada em conjunto com conectores (Figura 3.6).

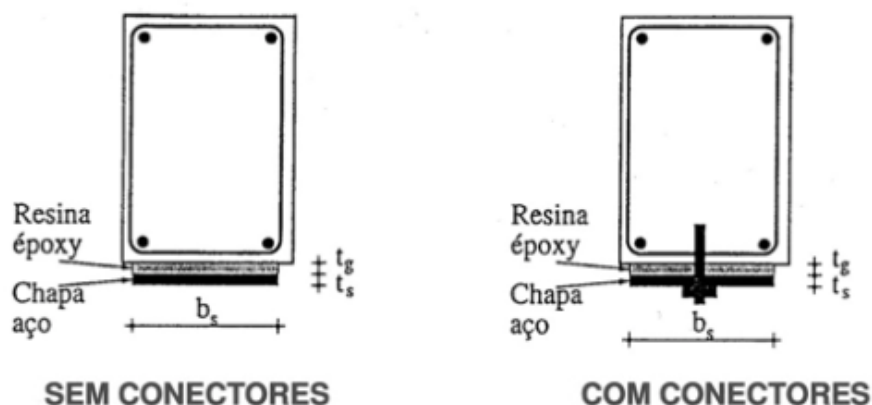


Figura 3.6 – Desenho esquemático de reforço estrutural utilizando colagem [15]

Costa [15] apresenta um modelo para execução de reforço por colagem de chapas metálicas com a utilização de conectores, onde se consideram quatro etapas.

- Escoramento;
- Preparação da superfície;
- Fixação das chapas;
- Colagem das chapas.

O escoramento tem por objetivo controlar a deformação das secções, impedindo deslocamentos e evitando que possa haver colapsos durante o reforço.

A preparação da superfície busca garantir uma ligação adequada entre as chapas e o betão. Para atingir o objetivo, pode ser necessário tornar as superfícies mais rugosas em alguns casos, o que pode ser feito por meio de equipamentos (martelo de agulhas; jato de areia; jato de água de alta pressão) que aumentem a rugosidade superficial do elemento a ser colado. Em casos onde não é necessária a alteração da superfície, deve-se proceder com limpeza superficial utilizando jato de água (Figura 3.7).

A fixação das chapas contempla a colocação das chapas no local, seguido de furação do betão e colocação de conectores.

A colagem das chapas ocorre quando as mesmas já estão fixadas, procedendo com selagem e injeção de resina (Figura 3.8).



Figura 3.7 – Limpeza utilizando jato de água de alta pressão [15]



Figura 3.8 – Colocação e colagem das chapas metálicas [15]

CAPÍTULO 4

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1. DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Com a intenção de obter resultados sobre a durabilidade de elementos mistos de aço-betão colados, foi elaborado um plano para a execução de provetes a serem submetidos a ataques que criem ambientes agressivos e desvantajosos estes elementos. Posteriormente, estes provetes são submetidos a ensaios de flexão, permitindo avaliar o seu desempenho e compará-lo com o de outros provetes similares que não foram submetidos a nenhum tipo de ambiente agressivo.

No ensaio de flexão, optou-se pela utilização de provetes de pequenas dimensões, com o objetivo de ser possível utilizar uma maior amostragem. Optou-se por produzir pequenas vigas de betão com dimensão de $215 \times 50 \times 50$ [mm³], que seriam coladas a elementos metálicos, formando elementos mistos de aço-betão.

Tendo em conta os ensaios que seriam realizados, prosseguiu-se para a definição da composição do betão, do perfil metálico a utilizar e da cola.

4.2. COMPOSIÇÃO DO BETÃO

A dosagem do betão foi estudada considerando o Método de Faury, , onde se procurou encontrar um valor otimizado para a composição ideal, respeitando os procedimentos e valores indicados pela NP EN 206-1 de 2007 [5], sobretudo no que diz respeito aos valores máximos de razão A/C, valores mínimos de resistência e dosagem de cimento, em função da classe de exposição.

Para a execução do elemento de betão conforme desenho esquemático apresentado na Figura 4.1, foram estudados individualmente os componentes do betão, e foram selecionadas as propriedades mais adequadas para cada um dos componentes.

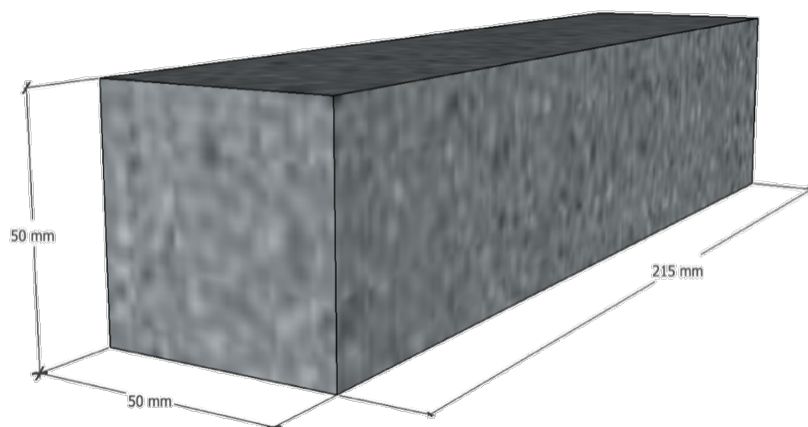


Figura 4.1 – Desenho esquemático das vigas de betão.

▪ CIMENTO

O ligante utilizado para compor o betão foi o cimento, neste caso específico um Cimento Portland CEM I 42,5R, que de acordo com sua ficha técnica é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência, sendo também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação [30]. A Tabela 4.1 apresenta as informações acerca do cimento utilizado no trabalho experimental.

Tabela 4.1 – Propriedades e dosagem do cimento

Ligante	Designação	γ (kg/m ³)	Dosagem (kg/m ³)
Cimento	CEM I 42,5 R	3100	360

▪ AGREGADOS

Tendo em vista as dimensões estipuladas para provetes, fez-se a escolha dos agregados, optando por aqueles que fossem compatíveis com o tamanho dos moldes e com a finalidade do elemento, resultando na combinação de utilização de uma Brita 4 – 8, e de uma Areia 0 – 4, ambas devidamente registadas e identificadas com marcação CE e acompanhadas de ficha técnica [31]. A Tabela 4.2 apresenta algumas das principais características dos agregados utilizados.

Tabela 4.2 – Tabela caracterização agregados

Peneiro mm	% Retidos Acumulados	
	Brita 4 - 8	Areia 0 - 4
63,0	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00
16,0	0,00	0,00
8,0	7,00	0,00
4,0	89,00	8,00
2,0	97,00	32,00
1,0	98,00	53,00
0,5	99,00	68,00
0,25	99,00	78,00
0,125	99,00	89,00
0,063	99,00	97,00
Absorção de Água (%)	0,60%	0,20%
Humidade (%)	0,76%	0,00%
Massa Volúmica (kg/m³)	2640	2660
D_{máx.} (ASTM)	8,00	4,00
Módulo Finura	5,83	3,93

▪ ADITIVOS E ADJUVANTES

Conforme dito anteriormente, dada a classe de exposição do betão a ser elaborado, optou-se pela utilização de um adjuvante superplastificante, com a finalidade de permitir a produção de um betão com elevada classe de trabalhabilidade, de baixíssima relação A/C, e fluido, durante o tempo necessário a colocação em moldes, além de apresentar outras vantagens tais como melhoria no acabamento superficial (fator importante quando se trata de uma estrutura que será posteriormente colada) e atingimento de maiores resistências mecânicas às primeiras idades.

Para tal, foi utilizado o adjuvante superplastificante MasterGlenium SKY 617, à base de éter policarboxílico, que apresenta elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade [32].

A Tabela 4.3 apresenta algumas das principais características do superplastificante utilizado.

Tabela 4.3 – Propriedades e dosagem do Superplastificante

Superplastificante (SP)	Teor de Sólidos	Dosagem	Dosagem (kg/m ³)
MasterGlenium SKY 617	18,0%	1,5%	30,00

▪ ÁGUA DE AMASSADURA

Considerando a utilização do SP em dosagem de 1,5%, foi utilizada uma razão água efetiva / ligante de 0,38. Ou seja, 136,80 l por m³ de betão.

▪ DOSAGEM DO BETÃO

A partir da utilização dos valores anteriormente definidos, foi obtida a dosagem final do betão a ser utilizado, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dosagem do betão

Material	Dosagens por m ³ de Betão	
Cimento	360,00	kg
Brita 4 - 8	682,72	kg
Areia 0 - 4	1238,02	kg
MasterGlenium SKY 617	30,00	kg
Água (w)	113,56	l

A Tabela 4.5 apresenta os valores percentuais dos agregados passados pelas peneiras, valores que possibilitam a obtenção de gráfico com os percentuais passados (eixo y,) confrontados com os valores de $D^{(1/5)} - 0,0065^{(1/5)}$ (eixo x), resultando nas curvas granulométricas dos elementos utilizados apresentadas na Figura 4.2.

Tabela 4.5 - Percentual passado pelas peneiras

Peneira (mm)	% Passados				
	Brita 4 - 8	Areia 0 - 4	c+m	m	m*
63,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
8,00	93,00	100,00	100,00	100,00	97,55
4,00	11,00	92,00	65,77	60,26	63,71
2,00	3,00	68,00	54,00	46,60	45,55
1,00	2,00	47,00	43,75	34,70	31,76
0,50	1,00	32,00	34,83	24,34	21,82
0,25	1,00	22,00	27,06	15,33	15,42
0,13	1,00	11,00	20,30	7,48	8,38
0,06	1,00	3,00	14,47	0,72	3,26

A Figura 4.2 apresenta as curvas granulométricas da Brita 4 – 8, da Areia 0 – 4, e outras 3 curvas, sendo elas: a curva c+m, que traz resultados sobre as dosagens para 30% de brita e 70% de fração fina; a curva ótima (m^*), obtida de acordo com o método de Faury; e a curva final utilizada (m), que é obtida por aproximação à curva ótima por meio da ferramenta computacional, apresentada no Anexo A1.

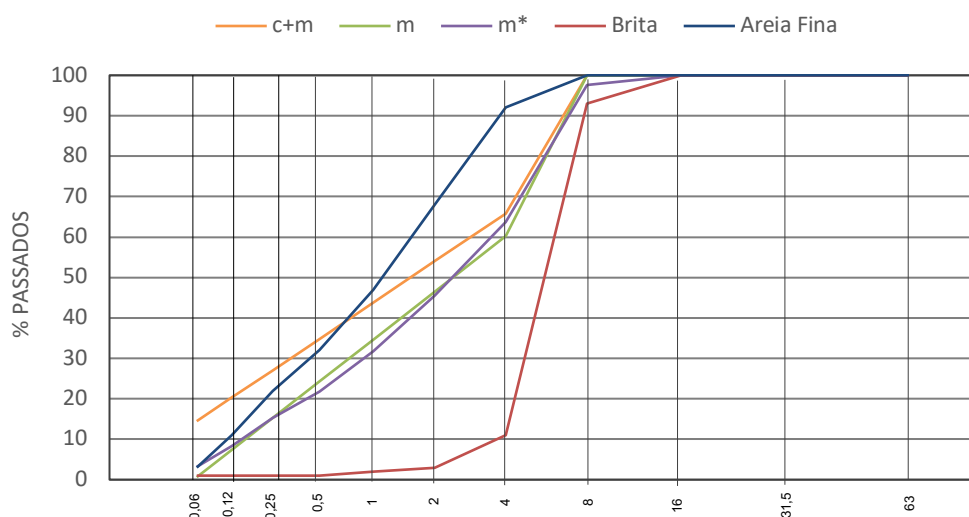


Figura 4.2 – Gráfico representativo das curvas granulométricas

4.3. PERFIL METÁLICO

Procurou-se utilizar um perfil metálico em chapa enformada a frio. Esta opção resultou da análise de diversos trabalhos recentes que procuram otimizar os elementos estruturais mistos a partir da opção por perfis metálicos mais leves. Destaca-se a facilidade de utilização destes elementos leves e o facto de adicionarem pouquíssimo peso à estrutura.

Neste contexto, a utilização dos perfis enformados a frio conta ainda com vantagens no que diz respeito à facilidade de produção, bem como razoável diversidade de formas e medidas dos elementos.

A partir daí, surgiu ainda o interesse de que o perfil a ser utilizado tivesse algum tipo de proteção própria, tornando-o sobretudo mais durável e resistente aos ambientes agressivos aos quais os provetes seriam submetidos, resultando desta forma na utilização de perfis em aço galvanizado.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional para pré-dimensionar a secção mista, apresentada no Anexo A2, elaborada de acordo com as disposições da NP EN 1994-1 de 2011 [8], considerando a possibilidade de utilizar inúmeros tipos de perfis enformados a frio existentes em catálogos de fabricantes, para tentar encontrar formas e dimensões que sejam interessantes para os ensaios de acordo com as capacidades resistentes resultantes dos cálculos de utilização para cada um deles.

Após a comparação entre vários possíveis perfis a serem utilizados, foi escolhido um perfil ômega em aço galvanizado ($\Omega 90^\circ$ AR $\times 50 \times 2,5$), com as propriedades geométricas enunciadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Geometria e secção bruta do perfil

Perfil	b. [mm]	h. [mm]	A. [mm ²]	Z _x [mm]	I _x [mm ⁴]
$\Omega 90^\circ$ AR $\times 50 \times 2,5$	50,0	50,0	526,2	21,2	188177,9

A partir das informações relativas ao perfil, a ferramenta computacional é capaz de realizar cálculos do comportamento da secção mista aço-betão colada, resultando nos valores apresentados pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Valores de referência dos provetes

#	Valor	Unid.	#	Valor	Unid.	#	Valor	Unid.
b _c	50	[mm]	f _y	260	[MPa]	H _{TOTAL}	100	[mm]
h _c	50	[mm]	E _v	210	[GPa]	Vão	200	[mm]
f _{ck}	56	[MPa]	h _s	50	[mm]	A _M	882	[mm ²]
E _c	35	[GPa]	A _s	444	[mm ²]	I _M	885183	[mm ⁴]
A _c	2500	[mm ²]	Z _s	21	[mm]	Z _M	48	[mm]
I _c	520833	[mm ⁴]	I _s	160731	[mm ⁴]	h _{cola}	2	[mm]
F _c	118	[kN]	b _s	40	[mm]	b _{cola}	40	[mm]
n	6	[]						

Em sequência, após os cálculos realizados pela ferramenta computacional, que podem ser verificados no Anexo A2, os valores finais da verificação apresentados pela Tabela 4.8 foram obtidos.

Tabela 4.8 – Valores de momento fletor resistente obtidos com recurso à ferramenta computacional

ANÁLISE PLÁSTICA						
A. [mm ²]	I. [mm ²]	f, [kN]	Z (mm)	M _{Rd} [kNm]	P _{rd} [kN]	t _{max,pl} [MPa]
526,2	188178	136,8	58,63	6,5	163,0	28,9

ANÁLISE ELÁSTICA						
A. [mm ²]	I. [mm ²]	f, [kN]	Z (mm)	M _{Rd} [kNm]	P _{rd} [kN]	t _{max,el} [MPa]
526,2	188178	136,8	45,0	5,8	110,1	14,7

4.4. ADESIVOS

A decisão de utilizar uma resina epoxídica como elemento de ligação resultou do reconhecido desempenho deste tipo de cola nas ligações entre os mais diversos tipos de materiais, inclusive quando da união de elementos de materiais distintos, possibilitando a execução dos provetes em estrutura mista de aço-betão colado, conforme desenho esquemático (Figura 4.3).

Neste sentido, optou-se por utilizar um material cujo desempenho é já razoavelmente reconhecido.

Para realizar a colagem entre a viga de betão e o perfil em aço galvanizado foi utilizada uma cola de epóxi tixotrópica em dois componentes, cuja ficha técnica define como uma cola estrutural e argamassa de reparação em dois componentes, à base de resinas epóxi e cargas especiais, isento de solventes, tixotrópico que pode ser aplicado em superfícies com alguma humidade, para utilização a temperaturas entre +10 °C e +30 °C [33].

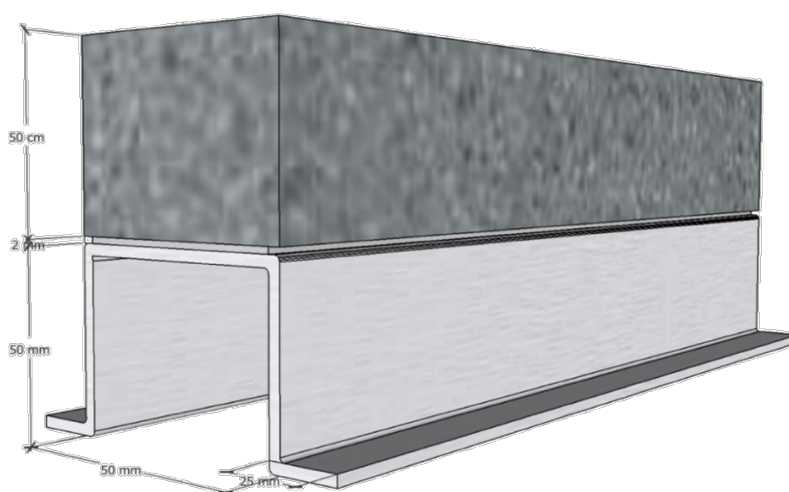


Figura 4.3 – Desenho esquemático do provete

4.5. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Uma vez definidos os materiais e procedimentos, foram executados os elementos a serem ensaiados.

▪ ENSAIOS PRELIMINARES

Com a finalidade de caracterizar o betão utilizado, no que diz respeito a resistência à compressão, seguindo os procedimentos indicados pela NP EN 206-1 de 2007 [5] foi realizada a mistura do betão, que em seguida foi vertido em moldes metálicos, executando cubos de $150 \times 150 \times 150$ [mm³], com o objetivo de realizar ensaio à compressão aos 7 e aos 28 dias (Figura 4.4).

Os resultados obtidos nos ensaios à compressão são apresentados na Tabela 4.9, tendo estes sido utilizados aquando do pré-dimensionamento e verificação da secção mista do elemento de aço-betão.



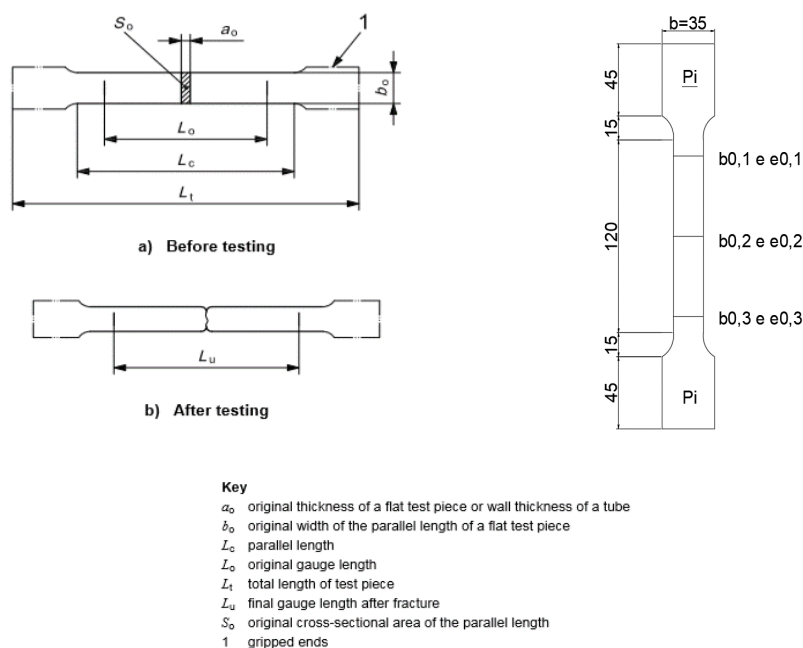
Figura 4.4 – Ensaio à compressão em cubos $150 \times 150 \times 150$ mm, aos 7 dias

Tabela 4.9 – Resultados do ensaio à compressão do betão aos 7 e 28 dias

ENSAIO À COMPRESSÃO DO BETÃO					
#	IDADE [Dias]	PESO [kg]	DIMENSÃO [mm ³]	RESULTADO [MPa]	
C#10 1	7	7,959	150 × 150 × 150	43,9	
C#10 2	7	7,929	150 × 150 × 150	47,5	
C#10 3	7	7,365	150 × 150 × 150	43,6	
Resistência média aos 7 dias				45,0	
C#12 1	28	7,885	150 × 150 × 150	55,3	
C#12 2	28	7,896	150 × 150 × 150	54,2	
C#12 3	28	7,952	150 × 150 × 150	57,3	
Resistência média aos 28 dias				55,6	

Após a obtenção da resistência à compressão do betão aos 28 dias, foi selecionado o perfil metálico e verificada a secção mista de aço-betão colada, conforme apresentado anteriormente na secção 4.3.

Uma vez encomendados e recebidos os perfis $\Omega 90^\circ$ AR × 50 × 2,5 em aço galvanizado, com o intuito de caracterização do aço quanto a resistência a tração, em acorandça com a norma ISO 6892-1 de 2009 [34], foram usinados provetes conforme indicação da Figura 4.5, seguindo as indicações dos anexos B e D da referida norma.



Key
 a_0 original thickness of a flat test piece or wall thickness of a tube
 b_0 original width of the parallel length of a flat test piece
 L_c parallel length
 L_o original gauge length
 L_t total length of test piece
 L_u final gauge length after fracture
 S_0 original cross-sectional area of the parallel length
 1 gripped ends

NOTE The shape of the test-piece heads is only given as a guide.

Figura 4.5 – Guia para execução de provetes

Os provetes após a rotura podem ser observados na Figura 4.6.



Figura 4.6 – Provetes após rotura ocorrida em ensaio de tração

Para a obtenção do Módulo de Elasticidade (E) do aço, a equação (4.1) pode ser utilizada, desde que se tenha os valores de σ (estresse uniaxial) e de ϵ (deformação proporcional).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4.1)$$

onde,

E é o módulo de elasticidade em [MPa]

σ é o estresse uniaxial, ou força uniaxial por superfície unitária

ϵ é a deformação proporcional

O Módulo de elasticidade (E) pode ainda ser obtido através da curva tensão x deformação, considerando-se apenas a parte do regime elástico, e tendo em vista que os ensaios forneceram estas curvas, foi possível validando desta forma a possibilidade de utilizar o valor de 210 GPa, referenciado pelo fabricante do perfil.

Ainda a partir da utilização da curva tensão x deformação, foi obtida a tensão de rotura (f_u) equivalente a 360 MPa e, através do método de deslocamento de 0,2%, foi obtida a tensão de cedência do aço (f_y) equivalente a 260 MPa.

Os gráficos a seguir representados pela Figura 4.7 apresentam como estes valores foram obtidos, para cada um dos provetes ensaiados, considerando valores de tensão em MPa (eixo x) e deformação (eixo y).

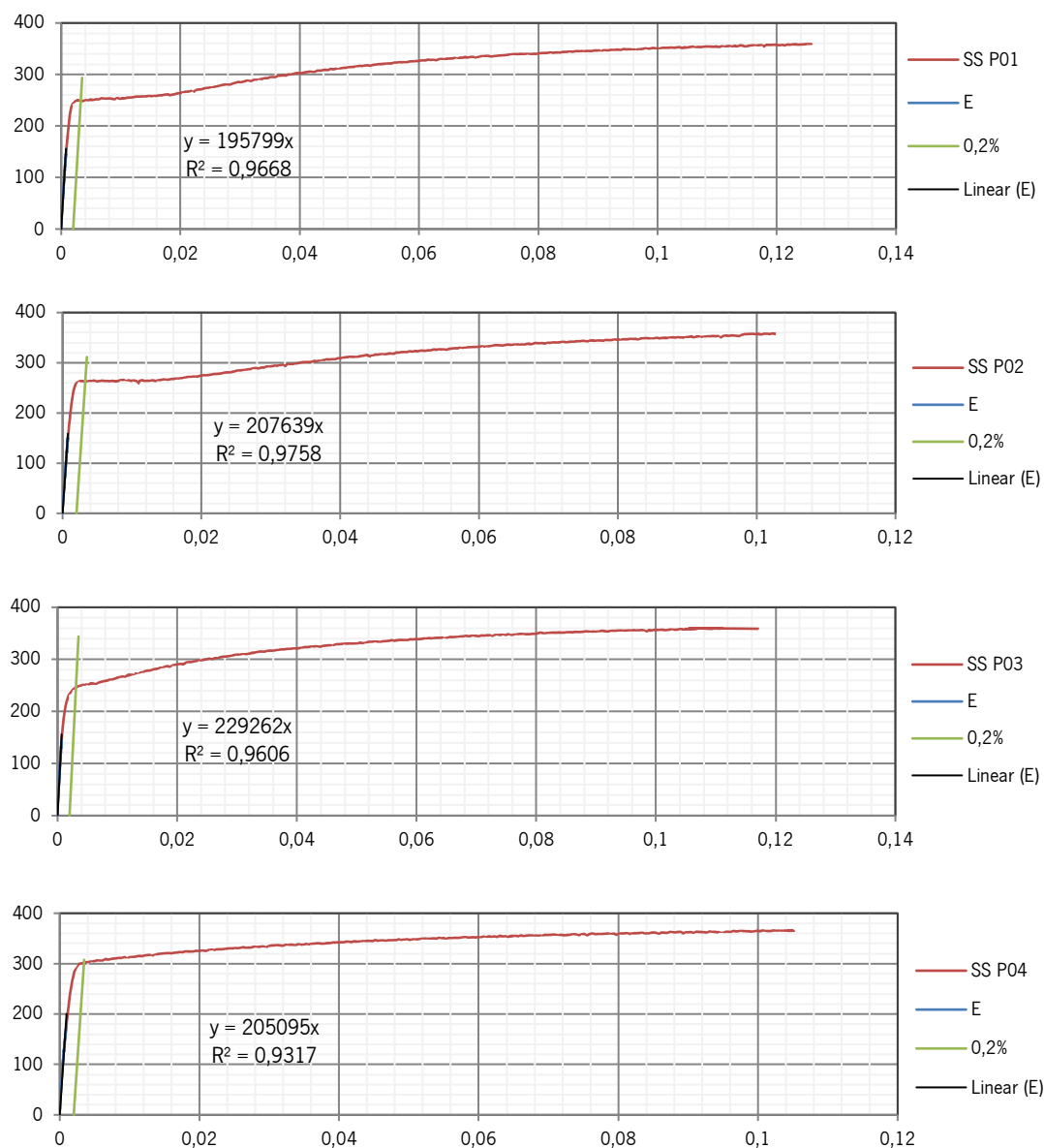


Figura 4.7 – Gráficos Tensão x Deformação utilizados para obtenção dos valores de f_y e f_u

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados na Tabela 4.10, tendo sido utilizados aquando do pré-dimensionamento e verificação da secção mista do elemento de aço-betão.

Tabela 4.10 – Resultados do ensaio à tração do aço

ENSAIO À TRAÇÃO DO AÇO									
#	Antes do Ensaio					Após o Ensaio			
	L_t [mm]	L_c [mm]	b_{medio} [mm]	e_{medio} [mm]	A_{seccao} [mm ²]	L_u [mm]	f_y [MPa]	f_u [MPa]	E [GPa]
P01	240	100	19,99	2,49	49,72	130	247	361	196
P02	240	100	20,25	2,49	50,36	135	258	358	208
P03	240	100	20,08	2,47	49,67	128	240	360	229
P04	240	100	19,87	2,35	46,70	128	295	367	205

As curvas de tensão vs deslocamento obtidas pelo ensaio para cada um dos provetes ensaiados são representadas no gráfico a seguir (Figura 4.8).

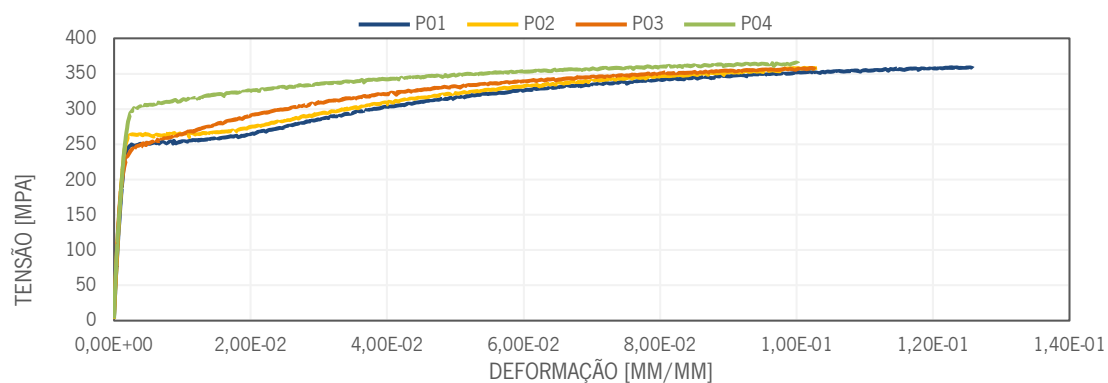


Figura 4.8 – Gráfico Tensão vs Deformação do ensaio à tração do aço

▪ PREPARAÇÃO DOS PROJETES

Para a espessura da colagem, o fabricante indica que deve ser utilizado um máximo de 30 mm [33], porém, tendo em vista o tamanho dos provetes utilizados, foram realizadas diversas tentativas de colagem, com espessuras entre 1,2 e 2,4 mm, resultando na utilização de uma espessura de 2,0 mm.

Foram realizados moldes (Figura 4.9), de modo a garantir uma maior homogeneização na colagem dos provetes, servindo como espaçadores.





Figura 4.9 – Realização da colagem entre os elementos de aço e betão

A fim de minimizar essa variável, e o procedimento de colagem foi realizado conforme a indicação constante na ficha técnica do fabricante [33], incluindo:

- Preparação das superfícies de betão e de aço;
- Mistura dos componentes A+B da cola estrutural;
- Aplicação com espátula metálica flexível;
- Obtenção de espessura de cola uniforme;
- Aplicação de pressão uniforme sobre os elementos colados;
- Endurecimento em temperatura ambiente.

Repetindo o processo por várias vezes, foram executados 30 provetes (Figura 4.10) para serem submetidos a diferentes situações de carregamento e/ou exposição a agentes agressivos.



Figura 4.10 – Imagem com alguns dos provetes executados

▪ AMBIENTES AGRESSIVOS

Foram criadas situações conhecidamente desfavoráveis para os elementos constituintes do elemento misto de aço-betão, procurando-se criar um ambiente prejudicial para cada um dos 3 elementos que constituem a viga: o aço, o betão e a cola.

Vasta literatura pode ser facilmente encontrada sobre a dificuldade do aço de resistir à corrosão, do betão de resistir às reações de expansão e das resinas epoxídicas de resistir às altas temperaturas. Desta forma, resolveu-se por utilizar três ambientes desfavoráveis, um para cada um dos elementos.

Para o aço e para o betão foram escolhidos ataques químicos, sendo um ambiente com alto teor de Cloreto de Sódio (NaCl), e outro ambiente de exposição a Sulfato de Magnésio (MgSO₄). Para acelerar a degradação por exposição aos ambientes foi desenvolvido um sistema para realização de ciclos (Figura 4.11), pré-programados e com acionamentos automatizados, de submersão em solução concentrada das substâncias, seguido de período de secagem em ambiente controlado, durante 60 dias.

Para que pudessem existir 2 ambientes (com e sem solução aquosa concentrada), foram utilizadas 2 caixas para cada uma das soluções, fazendo com que existisse sempre uma caixa cheia e uma vazia para cada uma das soluções.



Figura 4.11 – Sistema automatizado para aplicação de ciclos de molhagem e secagem

O sistema automatizado para a realização de ciclos foi concebido especialmente para este projeto, tendo sido projetado a partir da utilização de um Arduino, que é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* baseada em *hardwares* e *softwares* flexíveis, funcionando como um microcontrolador. No Arduino foram armazenadas as informações necessárias para controlar 4 bombas de imersão com capacidade de 100-350L/H, tendo estas sido calibradas

para realizar o esvaziamento dos tanques a cada 12h, ou seja, alterando o ambiente em que os provetes se encontravam de submerso para seco, e vice-versa.

As soluções concentradas foram realizadas de acordo com as recomendações das normas referidas ASTM C88 [9] no caso do Sulfato de Magnésio, e segundo procedimento interno do laboratório de materiais da Universidade do Minho para o Cloreto de Sódio.

Ataque químico por alta concentração de Cloreto de Sódio (NaCl)

O procedimento interno indica que a solução aquosa com alto teor de cloreto de sódio (NaCl) deve ser realizada em temperatura ambiente, com a adição do cloreto de sódio de forma gradual, realizada com o auxílio de agitador mecânico para a dissolução do sal na água, atingindo concentração de 105g / L (Figura 4.12).



Figura 4.12 – Provetes submetidos a ataque de cloreto (NaCl)

Foram submetidos um total de seis (06) provetes ao ambiente agressivo de cloreto de sódio (NaCl), com a finalidade de que três provetes fossem retirados após 30 dias de ataque onde após a limpeza do provete em água corrente é possível verificar que não houveram grandes alterações na superfície do provete, apenas pequenas perdas de galvanização em pequenas partes da superfície do perfil metálico (Figura 4.13).

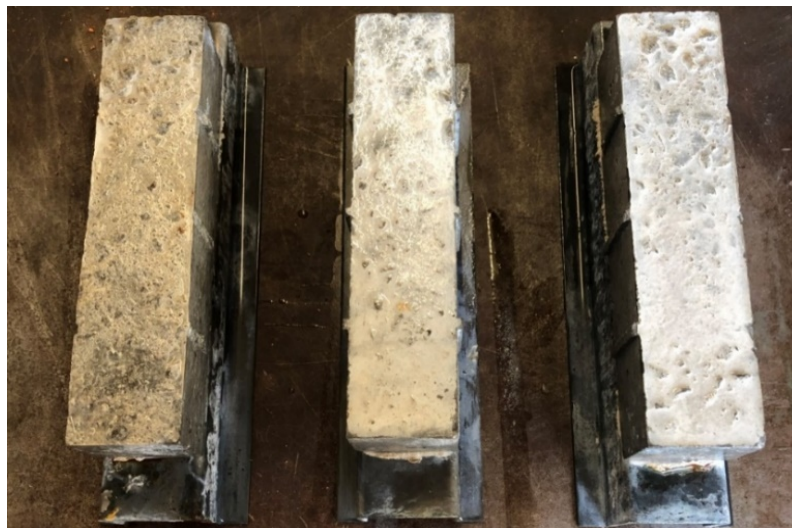


Figura 4.13 – Provetes após 30 dias em ataque de cloreto (NaCl) após serem lavados

Outros três provetes ficaram expostos ao ciclo de ataque por mais 30 dias, e após 60 dias de ataque pode-se perceber algumas alterações no acabamento superficial do provete, principalmente no perfil metálico, que além de perder considerável parte da galvanização, já começa a apresentar indícios de corrosão em vários pontos da estrutura (Figura 4.14).



Figura 4.14 – Provetes após 60 dias em ataque de cloreto (NaCl) após serem lavados

Ataque químico por alta concentração de Sulfato de Magnésio ($MgSO_4$)

A solução aquosa para exposição ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$) foi realizada em temperatura ambiente, com a adição do sulfato de magnésio de forma gradual, com o auxílio de agitador mecânico para a dissolução do sal na água, atingindo concentração de 350g / L (Figura 4.15).



Figura 4.15 – Provetes submetidos a ataque de sulfato (MgSO_4)

Um total de seis (06) provetes foi submetido ao ambiente agressivo de sulfato de magnésio (MgSO_4), com a finalidade de que três provetes fossem retirados após 30 dias de ataque, onde não é possível verificar grandes alterações na superfície do provete (Figura 4.16).



Figura 4.16 – Provetes após 30 dias em ataque de sulfato (MgSO_4)

Outros três provetes ficaram expostos ao ciclo de ataque por mais 30 dias, e após 60 dias de ataque pequenos sinais de deterioração podem ser percebidos (Figura 4.17).



Figura 4.17 – Provetes após 60 dias em ataque de sulfato ($MgSO_4$)

Ataque físico através de elevação da temperatura (até 100°C.)

Para a realização dos ensaios de elementos submetidos a temperaturas elevadas, os provetes foram colocados em estufas, com temperaturas reguladas de 60°C e a 100°C, para que pudessem ser ensaiados a 40°C e 80°C (Figura 4.18).



Figura 4.18 – Provete em estufa e durante ensaio a 40°C

▪ PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram todos executados em p3rtico de ensaio equipado com atuador servo-controlado, capacitado com c3lula de carga com capacidade de 200 kN, erro aproximado de 0,5% e com transdutor interno acoplado, com erro aproximado de 0,01%, capaz de aplicar carregamento por controlo de for3a ou de deslocamento. Para al3m do transdutor integrado no atuador, foram utilizados Transformadores Diferenciais Vari3veis Lineares (LVDT's, acr3nimo do ingl3s *Linear Variable Differential Transformer*) com curso de ± 50 mm e erro associado de 0,01%, posicionados em pontos chave do provete, tal como se descreve nos pr3ximos par3grafos. Todos os equipamentos descritos encontravam-se devidamente calibrados e aferidos para a realiza33o dos ensaios.

Todos os ensaios foram realizados utilizando os mesmos equipamentos, com as mesmas condi33es e disposi33o. Para o posicionamento do provete optou-se pela utiliza33o de uma mesa que possibilita o ajuste dos apoios, de modo a garantir uma dist3ncia entre si de 21 cm, valor limite admitido pelo provete de modo a aproveitar o m3ximo comprimento do elemento de bet3o. O carregamento foi aplicado atrav3s de uma carga central, posicionada no meio v3o, conforme desenho esquem3tico (Figura 4.19).

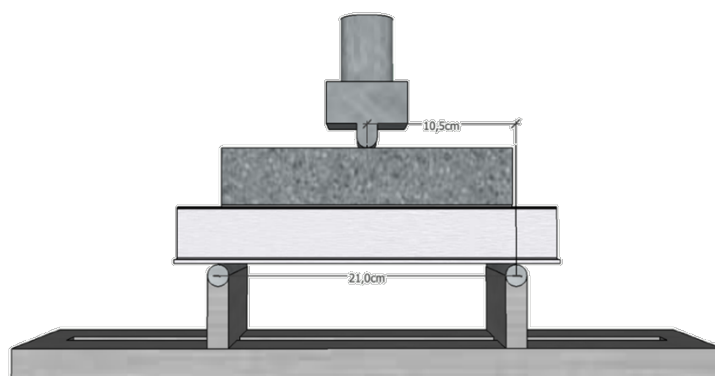


Figura 4.19 – Desenho esquem3tico de posicionamento de apoios e carga

De modo a aferir o deslocamento do provete em diferentes pontos, optou-se pela utiliza33o de 4 LVDT's, sendo um deles colocado em posi33o vertical para medir o deslocamento no meio v3o, na parte inferior do perfil met3lico, um segundo tamb3m posicionado na vertical, mas colocado no ponto mais pr3ximo do apoio, para que fosse poss3vel identificar eventuais deslocamentos nos apoios, e dois 3ltimos posicionados na horizontal na face lateral do bet3o,

um de cada lado, de modo a medir o escorregamento entre os elementos de aço e de betão no decorrer do carregamento, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 4.20. Salienta-se que os transdutores posicionados na horizontal eram fixos ao perfil metálico, de forma a poder medir a deformação relativa em relação ao elemento de betão.

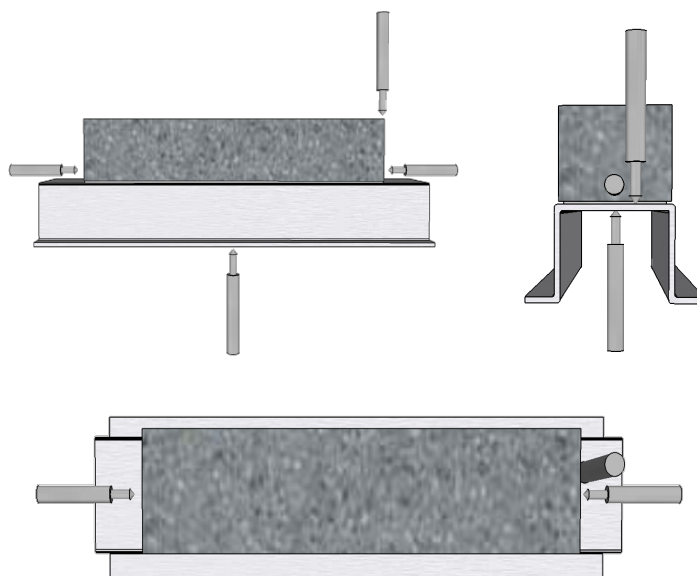


Figura 4.20 – Disposição dos LVDT's

Para o protocolo de ensaio foram consideradas duas situações, uma delas considerando o início do ensaio diretamente em controlo de deslocamento, sem que houvesse aplicação de qualquer tipo de carga, e uma segunda situação onde antes do controlo de deslocamento considerou-se aplicação de carga inicial, de forma cíclica.

▪ **CONTROLO DE DESLOCAMENTO, SEM APLICAÇÃO DE CARGA INICIAL**

- Inicialização do software DynaTester – Sistema de Controlo e Monitorização de Ensaio Dinâmicos (Figura 4.21), utilizado a partir de um equipamento ligado ao atuador;
- Procedimento de rotina a ser executada pelo atuador, incluindo a verificação dos LVDT's, e a definição do atuador em controlo de deslocamento, utilizando velocidade de 0,01mm/s;
- Posicionamento do provete no pórtico de ensaio, seguido de verificação de alinhamento e centralização dos apoios e da carga (Figura 4.22);

- Ajuste de distância do atuador até ao contato com o provete, sem aplicação de carga;
- Fixação e ajuste dos valores dos LVDT's (Figura 4.22);
- Finalização do ensaio, após se verificar uma perda de carga de pelo menos 40% da carga máxima, a fim de verificar a existência de cargas residuais.



Figura 4.21 – Ecrã do ensaio em execução, no software DynaTester

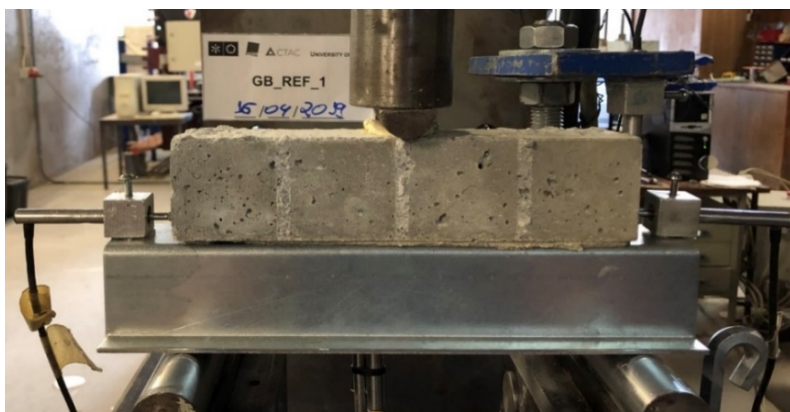


Figura 4.22 – Ensaio do Provete GB_REF_1

▪ **CONTROLO DE DESLOCAMENTO, APÓS APLICAÇÃO DE CARGA CÍCLICA INICIAL**

- Inicialização do software DynaTester – Sistema de Controlo e Monitorização de Ensaio Dinâmico (Figura 4.21), em equipamento ligado ao atuador;
- Posicionamento do provete no pórtico de ensaio, seguido de verificação de alinhamento e centralização dos apoios e da carga (Figura 4.22);
- Ajuste de distância do atuador até ao contato com o provete (Figura 4.22);

- Fixação e ajuste dos valores dos LVDT's (Figura 4.22);
- Procedimento de rotina a ser executado pelo atuador, incluindo a verificação dos LVDT's, iniciada com aplicação de carga inicial de 2kN com velocidade de 0,2 kN/s;
- Execução de 10 ciclos de carga e descarga atingindo picos de 10 kN e retornando aos 2 kN, com velocidade de 0,5 kN/s (como ilustrado pela Figura 4.23) – fase de carregamento implementada apenas em alguns dos provetes ensaiados;
- Aplicação de carga de 8 kN para posterior início de ensaio com carga inicial de 10 kN (o procedimento anterior termina com a carga a 2 kN), com velocidade de 0,5 kN/s;
- Definição do atuador em controlo de deslocamento, utilizando velocidade de 0,01mm/s;
- Finalização do ensaio com desenvolvimento adequado da curva força-deslocamento na posterior a ser atingida a carga máxima, a fim de avaliar o comportamento pós-pico e verificar a existência de cargas residuais.

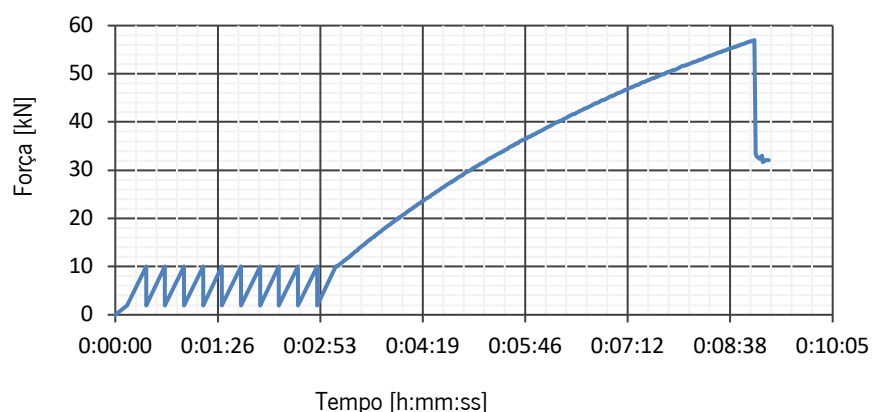


Figura 4.23 – Gráfico ilustrativo de simulação de rotina de ensaio

Após a realização de alguns testes utilizando ambos os protocolos, notou-se que a utilização de carga cíclica inicial antes da utilização do controlo de deslocamento conduziu os provetes a um comportamento consideravelmente distinto do observado quando realizado diretamente em controlo de deslocamento. Com base nesta avaliação, optou-se por utilizar o primeiro protocolo na generalidade dos ensaios realizados.

O comportamento das ligações aço-betão coladas sob a aplicação de cargas cíclicas é um campo que não será abordado, podendo ser posteriormente observado e explorado.

▪ ENSAIOS AOS PROVETES DE REFERÊNCIA (REF)

Para que fosse possível realizar uma comparação entre o comportamento de estruturas submetidas a ataques, foram utilizados provetes idênticos aos submetidos aos ataques, com mesmo procedimentos de execução e idade de cura, para que fossem adotados como ensaios de referência.

Durante os ensaios, foi possível verificar o comportamento do provete como um elemento misto de betão, onde o aço colado na parte inferior do betão (área tracionada) era efetivamente importante para a resistência do mesmo, sendo possível identificar evidências de rotura por corte no betão (Figuras 4.24 e 4.25). Após ser aplicada a carga máxima ao provete, foi possível observar o descolamento das componentes de aço e betão, na maior parte das vezes na superfície do aço, e outras vezes na superfície do betão (Figura 4.26), fazendo com que o provete perdesse o funcionamento misto. Esse descolamento ocorreu associado com a formação de uma fenda diagonal no elemento de betão (Figura 4.24), reduzindo drasticamente a capacidade resistente deste elemento.

No momento da descolagem entre os elementos de aço e de betão, vale ressaltar que em todas as situações houve a descolagem ou apenas no aço ou apenas no betão, permanecendo o elemento descolado sem nenhum vestígio de cola na área descolada, apresentando uma superfície lisa e limpa.



Figura 4.24 – Provelte GB_REF_3 durante o ensaio



Figura 4.25 – Provete GB_REF_1 após rotura

Foram considerados os resultados obtidos em três provetes de referência, identificados como GB_REF_1, GB_REF_2 e GB_REF_3, ensaiados em condições idênticas, que ao fim do ensaio apresentaram rotura conforme apresentado na Figura 4.26.

Vale a pena ressaltar que a cola apresentou, em todas as situações de descolagem, um aspecto vítreo na superfície que estava em contato com o elemento que perdeu aderência durante o ensaio (Figura 4.26).

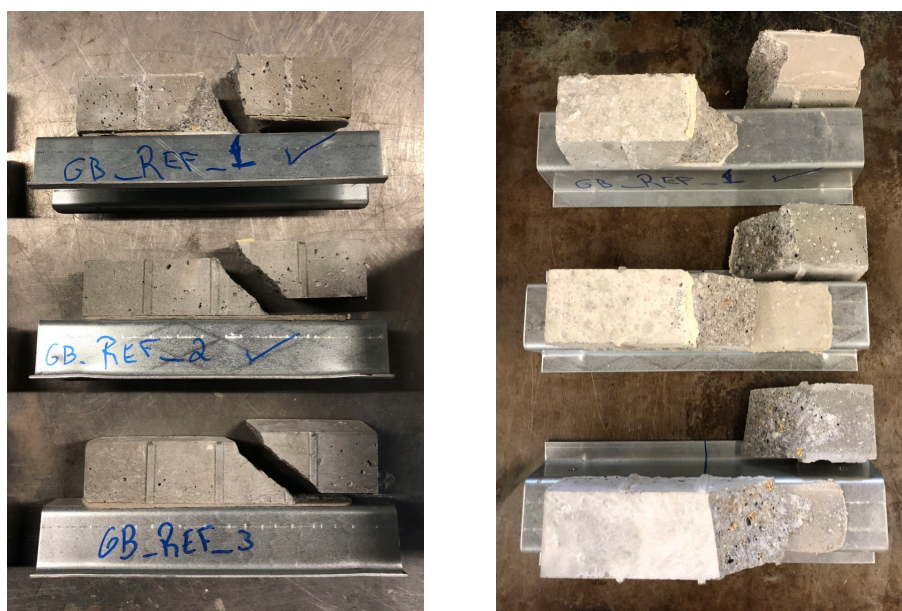


Figura 4.26 – Provetes de referência após rotura

▪ ENSAIOS EM PROVETES APÓS EXPOSIÇÃO A CLORETO (NaCl)

Foram realizados ensaios sobre dois grupos com três provetes cada que foram expostos ao ambiente saturado de cloreto de sódio (NaCl) ao longo dos dois intervalos de tempo de exposição

Após algum tempo de exposição foi possível observar a alteração do estado superficial do elemento, principalmente após 60 dias de exposição, conforme se constata nas figuras. Apesar disto, durante os ensaios, os provetes com 30 dias de exposição não apresentaram grandes alterações de comportamento, quando comparado com os provetes de referência, sobretudo quanto ao valor da carga máxima aplicada ao provete durante o ensaio. Já os provetes que passaram por ataque de cloreto de sódio por 60 dias apresentaram alguma alteração de comportamento, tanto ao nível da carga máxima atingida, como a forma de rotura, com indícios de descolamento prematuro. Para baixos níveis de força aplicada verificou-se a ocorrência de descolamento dos elementos de aço e de betão, fazendo com que o provete deixasse de ter um comportamento misto, propiciando desta forma o acontecimento de rotura do betão por flexão.

Um aspeto que pode ser observado, com comportamento diferente daquele que tinha sido registado nos provetes de referência, foi a forma de descolagem dos provetes. Os provetes com 30 dias de exposição foram os únicos elementos onde houve descolamento parcial da cola, tendo este ocorrido na parte mais externa (onde houve maior contato com a solução saturada de NaCl) no aço, e na parte mais ao interior da geometria da cola, no betão, conforme pode ser notado nas Figuras 4.27 e 4.28.



Figura 4.27 – Provetes submetido ao ataque de NaCl (60 dias) durante o ensaio



Figura 4.28 – Provede submetido ao ataque de NaCl (30 dias) após o ensaio



Figura 4.29 – Provetes submetidos ao ataque de NaCl após o ensaio

▪ ENSAIOS EM PROVETES APÓS EXPOSIÇÃO A SULFATO ($MgSO_4$)

Os ensaios com os provetes que foram expostos ao ambiente saturado de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) aconteceram com elementos submetidos a dois tempos de exposição, sendo três elementos expostos ao longo de 30 dias, e outros três elementos expostos durante 60 dias.

Após algum tempo de exposição foi possível observar apenas pouca alteração no estado superficial do elemento, conforme apresentado no item 4.5. No entanto, durante os ensaios, os provetes apresentaram grandes alterações de comportamento, sobretudo quando é atingida a

capacidade de carga máxima, bem como a forma de rotura, com indícios de descolamento prematuro. Verificou-se que, para baixos níveis de carga, já ocorreu descolamento entre os elementos de aço e de betão, fazendo com que o provete deixasse de ter funcionamento misto. (Figuras 4.30 e 4.31).

Em todos os elementos foi possível verificar um descolamento total entre a cola e o perfil metálico, sendo possível notar um aspeto vítreo na superfície desta, como pode ser observado nas Figuras 4.31 e 4.32.



Figura 4.30 – Provete submetido ao ataque de $MgSO_4$ (60 dias) durante ensaio



Figura 4.31 – Provete submetido ao ataque de $MgSO_4$ (30 dias) após o ensaio

A Figura 4.32 apresenta ainda, sucintamente, a forma de rotura dos provetes submetidos ao ataque de sulfato de magnésio, sendo os elementos $GB_MgSO_4_1$, $GB_MgSO_4_2$ e $GB_MgSO_4_3$ submetidos a ensaio após 30 dias de exposição, e os elementos $GB_MgSO_4_4$, $GB_MgSO_4_5$ e $GB_MgSO_4_6$ foram submetidos a ensaio após 60 dias de exposição.



Figura 4.32 – Provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$ após rotura

▪ ENSAIOS DOS PROJETOS APÓS ELEVAÇÃO DA TEMPERATURA

Os ensaios com os provetes que foram expostos a temperaturas elevadas aconteceram com elementos expostos a duas temperaturas máximas distintas, sendo três elementos inseridos em estufa com temperatura estabilizada em $60^{\circ}C$, para que fossem testados com aproximadamente $40^{\circ}C$, e outros três elementos inseridos em estufa com temperatura estabilizada em $100^{\circ}C$, para que fossem testados com aproximadamente $80^{\circ}C$.

Após tempo mínimo de 18h em estufa com temperatura constante, não foi possível visualizar alterações nos provetes que atingiram $60^{\circ}C$. No entanto, foi possível verificar descolamento entre a cola e a superfície do aço num dos provetes que atingiram os $100^{\circ}C$. Depois do descolamento, mesmo mantendo os elementos juntos sob pressão, os mesmos não voltaram a ter aderência, visto que a superfície da cola aparentava estar completamente endurecida.

O ensaio foi realizado mesmo com os provetes nas condições anteriormente descritas, e o resultado mostrou-se similar ao que foi obtido em outros provetes submetidos ao mesmo nível de temperatura, o que dá indícios de que ainda que os restantes provetes estivessem unidos pela cola, a ligação não garantia a transmissão dos esforços que se mobilizam (Figura 4.33).



Figura 4.33 – Provete submetido a elevação de temperatura durante ensaio

Durante os ensaios, os provetes apresentaram grandes alterações de comportamento (em comparação com os ensaios dos provetes de referência), sobretudo quando atingiram a carga máxima. A forma de rotura também foi distinta, onde para baixos níveis de carregamento, o descolamento dos elementos de aço e de betão já era visível. Este descolamento fez com que o provete deixasse de ter um funcionamento misto, propiciando desta forma a ocorrência de rotura no betão por flexão (Figuras 4.34 e 4.35).



Figura 4.34 – Provete submetido a elevação de temperatura (após rotura)

Em todos os provetes foi possível verificar um descolamento total entre a cola e o perfil metálico, sendo possível notar certo aspeto vítreo na superfície da cola Figura 4.35.



Figura 4.35 – Provete GB_T80_1 após rotura

A Figura 4.36 apresenta os provetes após o ensaio, onde se pode observar a forma de rotura dos provetes, sendo os elementos identificados como GB_T40_1, GB_T40_2 e GB_T40_3 submetidos a elevação até 60°C, com subsequente ensaio a 40°C e os elementos identificados como GB_T80_1, GB_T80_2 e GB_T80_3 foram submetidos a elevação de temperatura até 100°C, tendo sido ensaiados a 80°C.

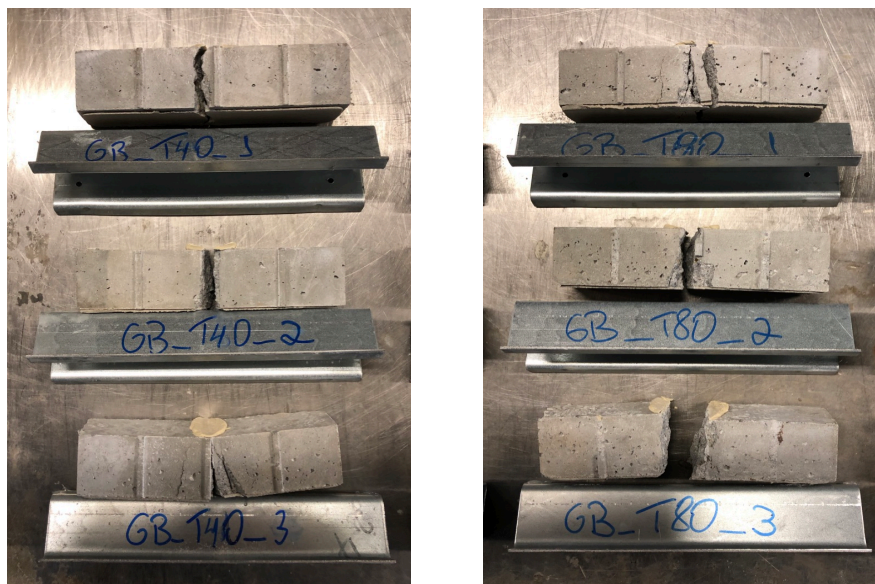


Figura 4.36 – Provetes submetidos a elevação de temperatura após rotura

4.6. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados com os provetes submetidos aos diferentes tipos de degradação foram reunidos em tabelas e gráficos.

Durante análise dos resultados destes ensaios de flexão pode-se perceber que os valores de deformação obtidos pelo LVDT posicionado no meio do vão foram muito próximos dos valores obtidos pelo LVDT posicionado na região de um dos apoios, conforme apresentado na Figura 4.37. Tal fato indica para que talvez haja alguma deformação que não pode ser bem medida, ou ainda que pode ter havido alguma falha na medição por parte de um, ou mesmo ambos os LVDTs, embora todos que foram utilizados são constantemente utilizados no laboratório e segundo informações fornecidas pelo técnico responsável, todos os equipamentos utilizados haviam sido calibrados recentemente.

O gráfico permite observar que para todos os três provetes de referência, a relação entre o deslocamento medido no meio do vão do provete e no ponto de apoio são muito próximos, o que excluindo as possibilidades anteriormente apontadas, sinaliza para o fato de que grande parte da deformação medida no meio do vão é devida a deformações localizadas nas almas e abas do perfil junto aos apoios, resultando em pequenos valores de deformação a meio vão.

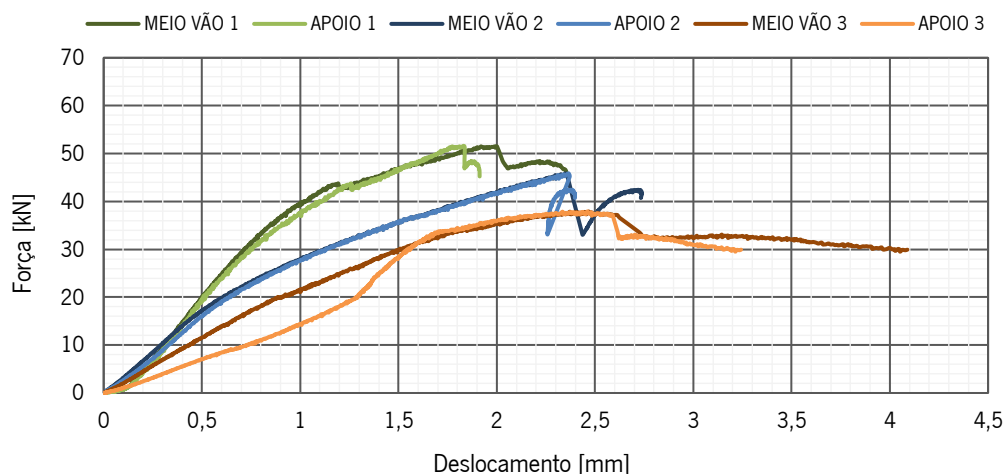


Figura 4.37 – Gráfico representativo de Força vs. Deslocamento no meio do vão e no apoio dos 3 provetes de referência

Acredita-se que esse efeito inesperado na região dos apoios pode ter influenciado de maneira relevante na diferença encontrada entre o comportamento das curvas dos três provetes

referenciais, bem como nos demais apresentados a seguir, fato este que deve ser considerado em trabalhos futuros.

Dando seguimento no objetivo desta investigação, ou seja, avaliar o comportamento dos elementos estruturais mistos colados no que diz respeito a durabilidade, a Tabela 4.11 apresenta valores obtidos por meio dos ensaios realizados em provetes submetidos a ataques de cloreto de sódio (NaCl), sendo considerados os três (03) provetes testados em cada situação, com subsequente comparação gráfica apresentada pela Figura 4.38.

Tabela 4.11 – Tabela comparativa para elementos submetidos a ambiente saturado de NaCl

Provete	Tempo de exposição [dias]	Força máxima - F_{max} [kN]	Rotura observada
GB_REF_1	0	51,51	Corte
GB_REF_2	0	45,82	Corte
GB_REF_3	0	37,91	Corte
Valor médio de F_{max}		45,08	
GB_NaCl_1	30	48,70	Corte
GB_NaCl_2	30	53,31	Corte
GB_NaCl_3	30	58,33	Corte
Valor médio de F_{max}		53,45	
GB_NaCl_4	60	33,89	Corte / Flexão
GB_NaCl_5	60	33,68	Corte / Flexão
GB_NaCl_6	60	36,31	Corte / Flexão
Valor médio de F_{max}		34,63	

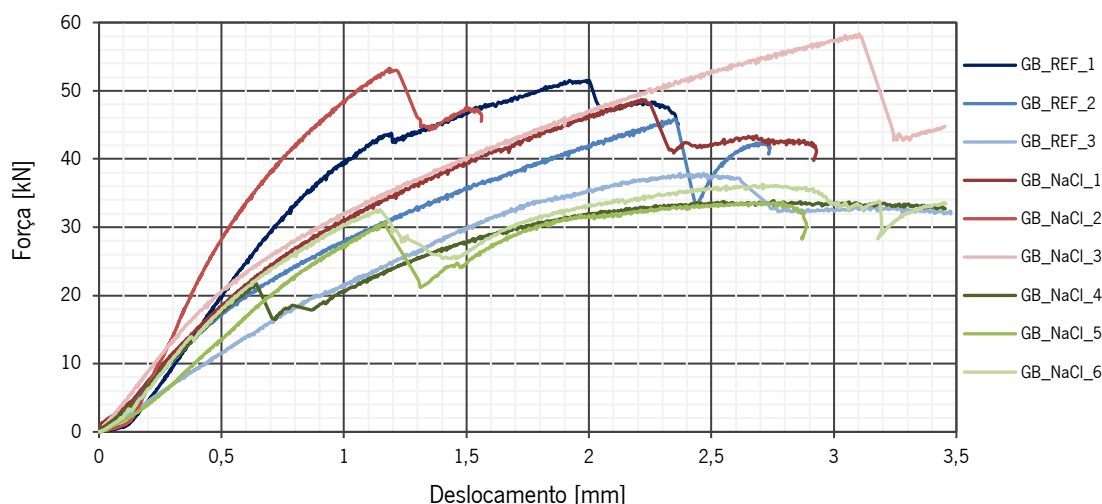


Figura 4.38 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de NaCl)

A partir da análise da relação entre força aplicada e a deformação sofrida a meio vão para os três provetes de cada tipo, pode-se verificar que até 30 dias de exposição não houve degradação dos elementos devido ao ataque, ocorrendo inclusive um incremento de aproximadamente 18,5%, que pode ser explicado pelo fato de ter havido maior tempo de cura do betão e da cola.

Já para os provetes que ficaram submetidos a 60 dias de exposição, a força suportada foi afetada, apresentando um decréscimo de aproximadamente 23,2%, devido à influência da corrosão do aço sobre a colagem, fazendo com que o adesivo estrutural perdesse sua capacidade de ligação entre os elementos de aço e betão, resultando em uma rotura por flexão do betão, após atingir uma força da ordem de 30 kN.

Aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não apresentou grandes alterações. Destaca-se que a fissuração do betão teve início com valores de deslocamento bem menores para os elementos onde a efetividade da cola foi perdida, porém após este momento, o provete seguiu em ensaio e apresentou resultados muito próximos para o deslocamento averiguado.

Já para os provetes submetidos a ataques de sulfato de magnésio ($MgSO_4$), a Tabela 4.12 apresenta valores comparativos obtidos por meio dos ensaios realizados após os ataques, sendo considerados os três (03) provetes testados em cada situação, com subsequente comparação gráfica apresentada pela Figura 4.39.

Tabela 4.12 – Tabela comparativa para elementos submetidos ambiente saturado de $MgSO_4$

Provete	Tempo de exposição [dias]	Força máxima - F_{max} [kN]	Rotura observada
GB_REF_1	0	51,51	Corte
GB_REF_2	0	45,82	Corte
GB_REF_3	0	37,91	Corte
	Valor médio de F_{max}	45,08	
GB_MgSO ₄ _1	30	31,49	Flexão
GB_MgSO ₄ _2	30	30,50	Flexão
GB_MgSO ₄ _3	30	29,54	Flexão
	Valor médio de F_{max}	30,51	
GB_MgSO ₄ _4	60	34,30	Flexão
GB_MgSO ₄ _5	60	46,89	Corte / Flexão
GB_MgSO ₄ _6	60	31,55	Flexão
	Valor médio de F_{max}	37,55	

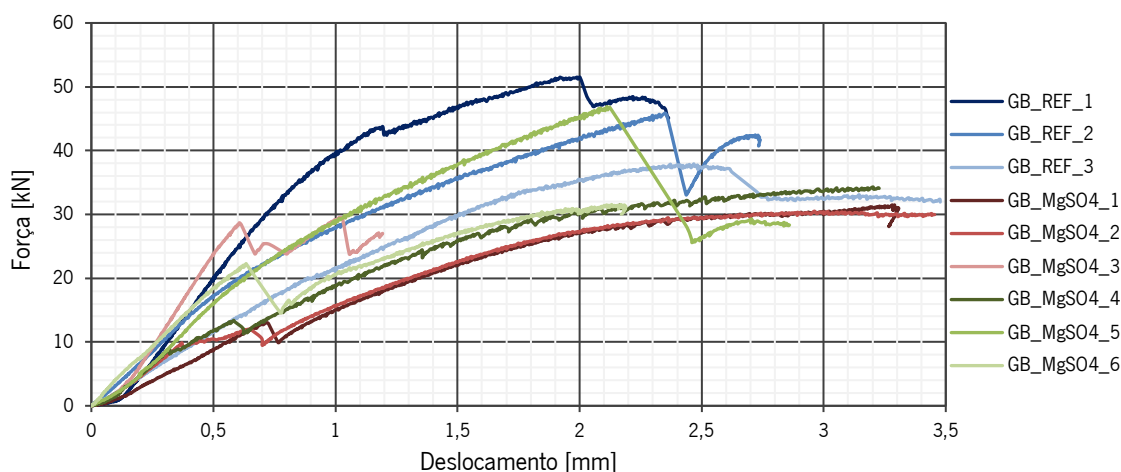


Figura 4.39 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$)

A partir da análise da relação entre a força aplicada e a deformação sofrida a meio vão para os três provetes de cada situação, onde se verifica que já a partir dos 30 dias de exposição a carga suportada foi afetada, apresentando um decréscimo de aproximadamente 32,3%, devido a degradação do betão junto à interface cola/betão, de forma a afetar o desempenho do adesivo estrutural, fazendo com que a ligação entre os elementos de aço e betão fosse comprometida, resultando em uma rotura por flexão do betão, após atingir uma força da ordem de 30 kN. Novamente aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não apresentou grandes alterações.

Concluindo os experimentos envolvendo provetes submetidos a ambientes desfavoráveis, para os provetes expostos a elevação de temperatura (ensaiados a 40°C e 80°C), a Tabela 4.13 apresenta valores comparativos obtidos por meio dos ensaios realizados, sendo considerados os três (03) provetes testados para cada situação, com subsequente comparação gráfica apresentada pela Figura 4.40, que representa a relação entre a força aplicada e a deformação sofrida a meio vão para os três provetes de cada situação, onde se verifica que a partir do aumento da temperatura houve um decréscimo da força resistente alcançada de aproximadamente 28,9% nos provetes ensaiados a 40°C e 38,8% nos provetes ensaiados a 80°C, o que aconteceu devido à degradação da cola, acarretando em um descolamento dos elementos fazendo com que perdessem o comportamento conjunto, resultando em uma rotura por flexão do betão, após atingir forças próximas a 30 kN.

Tabela 4.13 – Tabela comparativa para elementos submetidos temperaturas elevadas

Provete	Temperatura de ensaio [°C]	Força máxima - F_{max} [kN]	Rotura observada
GB_REF_1	19	51,51	Corte
GB_REF_2	19	45,82	Corte
GB_REF_3	19	37,91	Corte
	Valor médio de F_{max}	45,08	
GB_T40_1	40	31,32	Flexão
GB_T40_2	40	31,72	Flexão
GB_T40_3	40	33,10	Flexão
	Valor médio de F_{max}	32,05	
GB_T80_1	80	27,29	Flexão
GB_T80_2	80	28,77	Flexão
GB_T80_3	80	26,77	Flexão
	Valor médio de F_{max}	27,61	

Novamente aponta-se para o facto de que o nível de deformação apresentado pelos provetes não sofreu grandes alterações, porém deve-se levar em conta o facto de que a fissuração do betão pode ser identificada com deslocamentos bem menores para os elementos onde a efetividade da cola foi perdida, porém após este momento, o provete seguiu em ensaio e apresentou resultados muito próximos para o deslocamento averiguado.

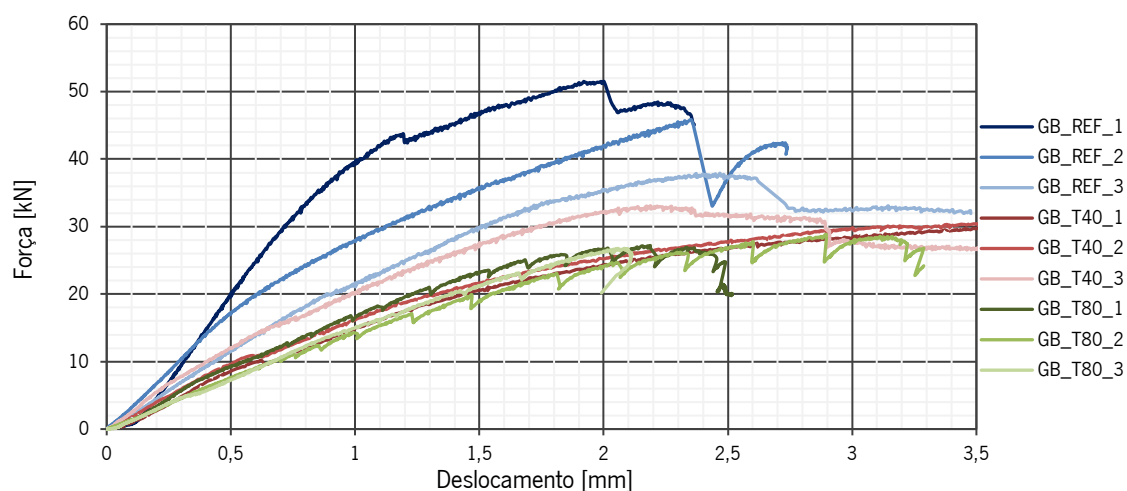


Figura 4.40 – Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos a aumento de temperatura)

Neste caso em específico, não é possível identificar a partir do gráfico pontos de perda de carga considerável, que sinalizam a perda de efetividade da cola, dando indícios de que os provetes submetidos aos ensaios podem ter tido um comportamento de apenas sobreposição, sem que houvesse ligação entre os elementos de aço e betão.

Como pode ser observado no conjunto de gráficos e tabelas apresentados, os provetes mistos de aço-betão apresentaram considerável alteração de comportamento quando submetidos aos ambientes desfavoráveis, principalmente quando na presença de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e elevação da temperatura.

Aponta-se para a possibilidade de que o material utilizado para realizar a colagem entre os elementos de aço e betão possa ter tido um comportamento muito rígido, o que pode ter tido influência muito forte nos resultados apresentados e, desta forma, considerando os resultados obtidos, uma reanálise das dimensões e propriedades dos materiais constituintes dos provetes aponta para que em trabalhos futuros, deve ser considerada, além da utilização de outras colas estruturais, novas dimensões e/ou geometrias para os provetes.

Será também importante limitar a deformação do provete na região do apoio, para que possam ser obtidos resultados de deformação mais precisos.

CAPÍTULO 5

MODELAÇÃO NUMÉRICA

A avaliação do comportamento de uma estrutura pode ser realizada através de ensaios experimentais e, também, por meio de modelações numéricas. As modelações numéricas beneficiaram de uma grande disseminação nos últimos anos com a evolução dos sistemas computacionais. Quando concebidas da forma correta, auxiliam, com custos mínimos, a identificar as melhores soluções para uma determinada estrutura e orientam futuros ensaios experimentais. Podem também ser realizadas como complemento à informação que é recolhida durante os ensaios experimentais e utilizando os resultados obtidos como aproximação a modelação da realidade [35].

As modelações numéricas são geralmente desenvolvidas com base no método dos elementos finitos, MEF. Esta metodologia é aplicada para obter o estado de tensão e deformação de um sólido exposto a ações exteriores e pode ser formulado por meio do método dos deslocamentos. O método dos elementos finitos surgiu na década de 60 do Séc. XX, mas teve sua difusão com a evolução dos sistemas computacionais devido à complexidade dos cálculos envolvidos. Os primeiros elementos finitos eram os triangulares e os tetraédricos, mas na atualidade verifica-se uma predileção por elementos quadriláteros e hexaédricos. O estudo de uma estrutura pode ser desenvolvido através de uma análise linear ou não linear. Na análise linear geométrica, considera-se a geometria inicial da estrutura. Em contrapartida, na análise não linear geométrica, as ações aplicadas à estrutura provocam deformações que interferem no comportamento da estrutura – as alterações da geometria influenciam os esforços na estrutura. No que respeita ao material que compõe a estrutura, se a relação a tensão e a deformação é não linear, isso indica que se verificam alterações das propriedades do material com aplicação dos esforços [36].

Neste capítulo pretende-se analisar elementos estruturais mistos colados em aço e betão, quando submetidos a flexão, através de um modelo numérico concebido com auxílio do *software* Atena 3D, um programa que tem por base o método dos elementos finitos e está vocacionado

para desenvolver análises estruturais não lineares de elementos estruturais que utilizam betão armado.

O desenvolvimento de um modelo no *software* Atena 3D, é realizado através de três etapas: entrada dos *inputs* (definição de materiais, definição da geometria, definição do tipo de conexão, delimitação das condições de carregamento, etc.), obtenção dos primeiros *outputs* (resultados prévios) e os resultados finais expressos, tanto de forma numérica quanto gráfica [35].

Considerando os resultados obtidos através dos ensaios realizados, e considerando que o *software* Atena 3D tem funcionalidades de explorar a durabilidade dos modelos, quanto por exemplo diante de carbonatação, cloretos e reações alcali-agregados, o modelo base desenvolvido neste trabalho foi concebido de acordo com a configuração dos provetes referenciais submetidos à flexão, apresentados no capítulo anterior. O ensaio de flexão anteriormente apresentado foi realizado através de incrementos de deformação diretamente aplicados à viga de betão.

Para facilitar o cálculo computacional, e visto que o modelo é simétrico, modelou-se apenas metade da estrutura.

5.1. DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS

De acordo com o tutorial fornecido pelo *software* Atena 3D [37], a criação de um modelo tem início com a definição das propriedades dos materiais que serão utilizados.

O *software* utilizado possui uma vasta quantidade de leis de comportamento material e a sua seleção deve ser criteriosa. Nas secções a seguir, são apresentados os materiais seleccionados para o provete utilizado no ensaio de flexão e são identificadas as propriedades atribuídas a cada material.

5.1.1. VIGA DE BETÃO

Para os elementos que constituem a viga de betão seleccionou-se o material “*3D Nonlinear Cementitous 2*”. Esta lei constitutiva considera um comportamento não linear elástico do material, até se atingir o valor da respetiva resistência, a que se segue uma fase de endurecimento. [38].

Através do trabalho experimental foi possível obter a resistência à compressão (f_c) do betão utilizado, e a partir deste, seguindo as indicações do Model Code 2010 [39], foram determinadas outras propriedades básicas como o módulo de elasticidade (E), a resistência à tração média (f_{ctm}), o coeficiente de Poisson (μ) e a energia de fratura (G_F).

De acordo com o Model Code 2010 [39], quando a resistência à compressão do betão aos 28 dias (f_{cm}) é conhecida, o módulo de elasticidade pode ser estimado pela equação (5.1). No caso do material utilizado neste trabalho, o resultado de módulo de elasticidade obtido tem o valor de 36 GPa,

$$E_{ci} = E_{c0} \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (5.1)$$

onde,

E_{ci} é o módulo de elasticidade em [MPa] do betão aos 28 dias

f_{cm} é a resistência à compressão em [MPa] média do betão aos 28 dias

$E_{c0} = 21,5$ MPa

α_E é 1.0 para agregados de quartzo.

A energia de fratura do betão foi determinada através da equação (5.2), também extraída do Model Code 2010 [39]. De acordo com esta regulamentação, esta propriedade possui uma relação direta com resistência à compressão do betão. Considerando a resistência à compressão média do betão com 55,6 MPa, o valor da energia de fratura é 150 N/m.

$$G_F = 73 \cdot f_{cm}^{0,18} \quad (5.2)$$

Onde,

f_{cm} é a resistência à compressão em [MPa] média do betão aos 28 dias.

Com base na resistência à compressão, é ainda possível determinar a resistência à tração média do betão. De acordo com a equação (5.3), extraída, também, do Model Code 2010 [39], a resistência à tração do betão é de 3,94 MPa,

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (5.3)$$

onde,

f_{ck} é a resistência à compressão em [MPa] característica do betão aos 28 dias.

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f$$

$$\Delta f = 8 \text{ MPa.}$$

Segundo o Model Code 2010 [39], o coeficiente de Poisson varia entre 0,14 e 0,26 para betões com tensões entre $0,6 f_{ck}$ e $0,8 f_{ck}$, sendo o valor 0,2 atribuído a esta propriedade por defeito pelo Atena 3D. Apresenta-se a Figura 5.1 que resume os valores atribuídos a todas as propriedades do betão utilizado nos modelos numéricos. As restantes propriedades não anteriormente mencionadas foram preenchidas com os valores atribuídos automaticamente por defeito pelo Atena 3D.

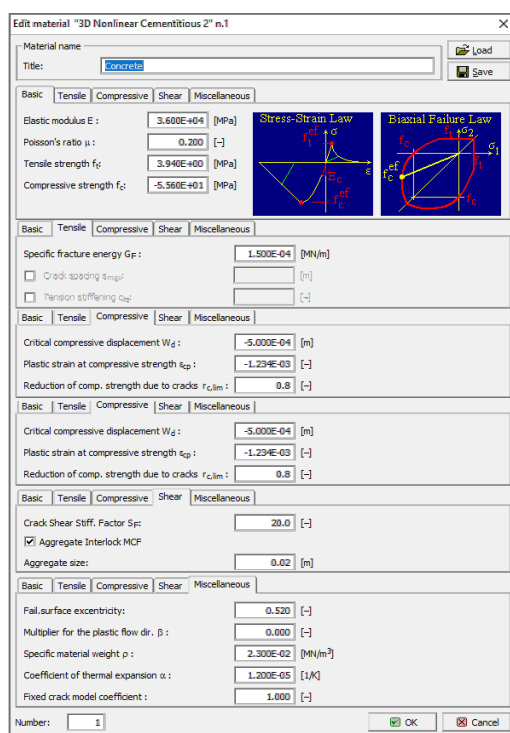


Figura 5.1 – Propriedades do betão (Atena 3D)

5.1.2. PERFIL METÁLICO

O perfil metálico utilizado nos ensaios era do tipo enformado a frio. Selecionou-se o material do tipo “3D Bilinear Steel Von Mises”, que se destina a materiais metálicos com comportamento elasto-plástico, sendo inicialmente atribuídas propriedades genéricas tais como as fornecidas pelo fabricante do perfil, com módulo de elasticidade de 210 GPa e tensão de cedência de

220 MPa, mantendo as demais propriedades consideradas por defeito pelo Atena 3D para este tipo de material.

Apenas após a maior parte do trabalho presente neste capítulo ter sido realizado foi possível realizar o ensaio de tração do aço apresentado no capítulo anterior, que acabou por resultar em valores ligeiramente divergentes dos considerados para a tensão de cedência, devendo esta ser corrigida para o valor de 260 MPa de forma a manter a máxima fidedignidade entre os provetes ensaiados e o modelo.

Para perceber a diferença entre a utilização deste valor obtido por ensaio, em substituição ao valor referenciado, dois modelos idênticos foram calculados, onde pode-se perceber que o modelo com 260 MPa de tensão de cedência do aço foi ligeiramente mais rígido, apresentando cerca de 4% de decréscimo na deformação medida no meio do vão, para a mesma força aplicada, e os valores de escorregamento e deformação no apoio não sofreram alterações significativas (inferiores a 1%).

Desta forma, tendo em vista que a diferença observada foi pequena, optou-se por manter os resultados anteriormente obtidos, utilizados na calibração do modelo, sendo corrigido o valor da tensão de cedência do aço apenas no modelo final, ficando este com as propriedades conforme apresentado na Figura 5.2.

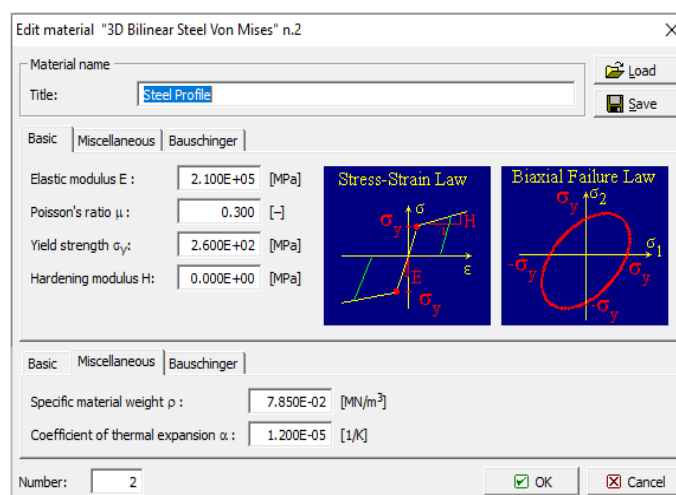


Figura 5.2 – Propriedades do material usado no perfil metálico (Atena 3D)

5.1.3. ELEMENTOS DE APOIO E DISTRIBUIÇÃO DE CARGA

Para compor os macroelementos que simulam os elementos dos apoios e o elemento de distribuição de carga, optou-se por utilizar um material com comportamento definido como “*3D Elastic Isotropic*”, com um módulo de elasticidade equivalente ao do perfil enformado a frio utilizado.

Após várias tentativas de correr o modelo, experimentando diferentes combinações de ajustes nas definições da malha utilizada, da carga aplicada, da geometria dos elementos de apoio e distribuição de carga e das características dos materiais, foi necessário alterar as propriedades do material utilizado no elemento de distribuição de carga, tendo em vista que não seria interessante realizar alterações nos demais materiais, para que sejam coincidentes com os materiais utilizados nos ensaios, e nem na geometria do elemento de distribuição de carga, que simula a ação do atuador em controlo de deslocamento utilizado no ensaio a flexão.

Optou-se por utilizar um módulo de elasticidade 10 vezes maior do que o do betão utilizado na viga, a fim de eliminar o problema de concentração de carga localizada existente na região da aplicação da carga, como pode ser observado na Figura 5.3, que ainda aos 25 kN de carga total aplicada, já apresentava um padrão de fendilhação bastante elevado na região da aplicação da carga, o que não acontecia nos ensaios.

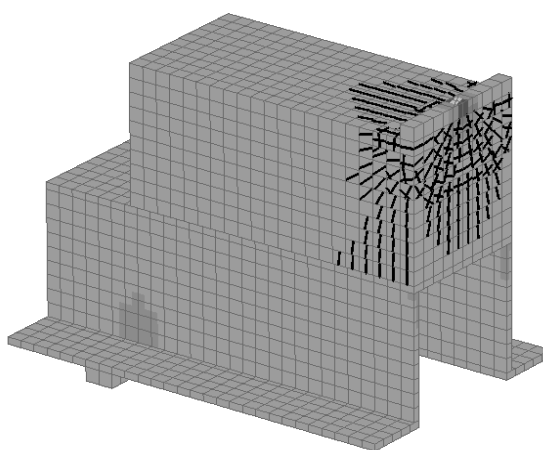


Figura 5.3 – Modelo com concentração de cargas de maneira indesejada na região da aplicação de carga

As outras propriedades do material não foram alteradas, tendo sido atribuídas as propriedades apresentadas na Figura 5.4.

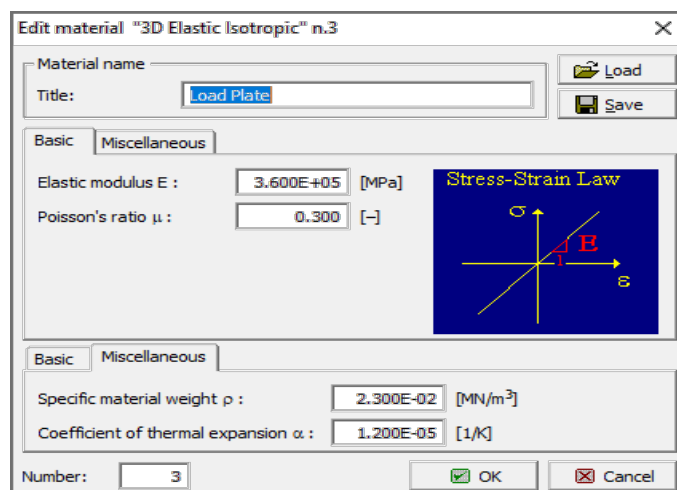


Figura 5.4 – Propriedades do material dos elementos de apoio (Atena 3D)

5.1.4. ADESIVO ESTRUTURAL (COLA)

Para representar a ligação colada, foi adotado um material do tipo “3D Interface”, sendo atribuídas as propriedades apresentadas na Figura 5.5.

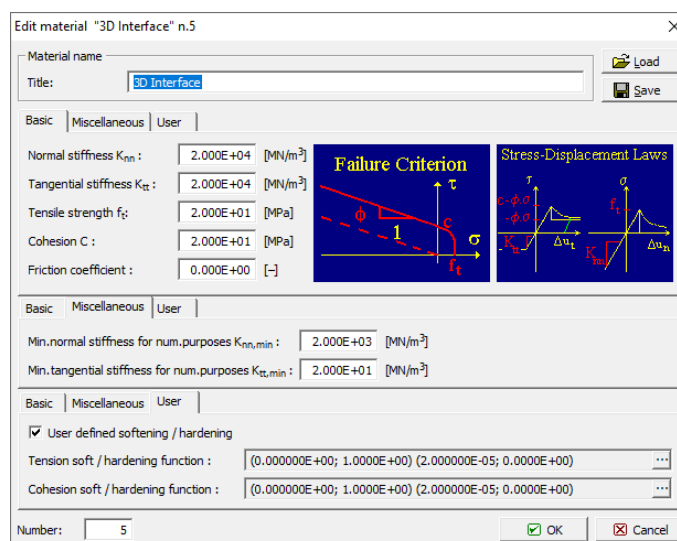


Figura 5.5 – Propriedades do material de interface (Atena 3D)

5.2. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A geometria global do elemento misto foi definida de forma a reproduzir os provetes utilizados no trabalho experimental, seguindo as dimensões e a geometria anteriormente definidas para os provetes conforme Figura 5.6.

Para diminuir o esforço computacional, foi definido que o modelo tiraria partido da simetria do provete, reproduzindo-se apenas metade do mesmo.

De maneira complementar, foram adicionados macroelementos nos pontos de apoio e de aplicação de carga, de forma a possibilitar a aplicação das condições de fronteira e receber os esforços solicitantes sem que ocorressem efeitos locais indevidos.

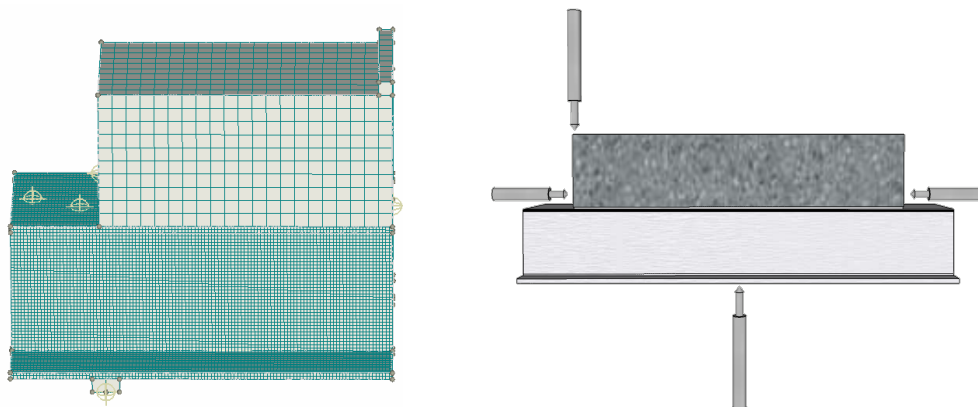


Figura 5.6 – Geometria do modelo criado e geometria de provete utilizado nos ensaios

Estes macroelementos foram dimensionados de forma a reproduzir a realidade dos ensaios, quando o provete ficava biapoiado em uma base, recebendo carga ao meio do vão, por meio de um atuador servo controlado com extremidade em forma de meia cana, considerando ainda a utilização de massa de aço para estabilizar e melhor distribuir a carga na região de contato.

5.3. DEFINIÇÃO DA MALHA

Em todos os macroelementos do modelo se deu preferência à utilização de elementos finitos de tipo *brick* (elementos finitos quadriláteros). Para garantir que houvesse no mínimo dois elementos finitos ao longo da espessura do perfil metálico (menor dimensão entre os constituintes do provete), definiu-se o tamanho absoluto da malha igual a 1,25 mm. Porém com essa escolha, o modelo ficou com um esforço computacional extremamente elevado, tornando as atividades extremamente lentas, e inviabilizando a utilização da malha com essa dimensão.

Tendo em vista a impossibilidade de utilizar a malha inicialmente planeada, foram desenvolvidas várias tentativas de ajuste da malha. Com a utilização da malha com a dimensão global de 2,50 mm, o modelo apresentava um comportamento muito pesado, com tempo de cálculo de

aproximadamente 18h. Em contrapartida, com uma malha maior, com elementos finitos de dimensão global igual a 5 mm, o tempo médio de cálculo era de aproximadamente 30 min. A alteração da malha representou um ganho computacional extremamente relevante, porém com um comportamento inesperado, já que se geraram resultados representativos de um modelo bem mais rígido, mesmo sem que tenha sido alterado qualquer outro parâmetro.

Diante disto, optou-se por utilizar malha com diferentes dimensões para os vários elementos constituintes da viga (betão, aço e elementos de aplicação de carga e apoio), possibilitando que com um menor número total de elementos finitos (de forma a otimizar o tempo de cálculo), fossem atribuídos maior número de elementos finitos ao longo do perfil metálico. Os resultados foram mais satisfatórios, aproximando-se expressivamente dos resultados encontrados nos ensaios.

A Figura 5.7 apresenta de maneira sucinta, através de um gráfico de força vs deslocamento, este trabalho de encontrar a malha mais adequada para o modelo. Aponta-se em especial para a comparação das curvas “Malha 2,5” e “Malha 5,0 e 2,5”, onde foram criados modelos com mesma dimensão de malha para o perfil metálico, porém com alteração de dimensão na viga de betão, e que apresenta valores extremamente próximos. Considerando a validação da utilização de diferentes dimensões de malha nos diferentes elementos, optou-se pela utilização da malha com dimensão de 5 mm na viga de betão, elementos de apoio e distribuição de cargas, e outra malha com dimensão de 1,20 mm na região do perfil enformado a frio, que embora ainda seja muito pequena, gerando um esforço computacional consideravelmente elevado, garante que haja no mínimo dois elemento de malha em toda a espessura do modelo, apresentando resultados mais realistas.

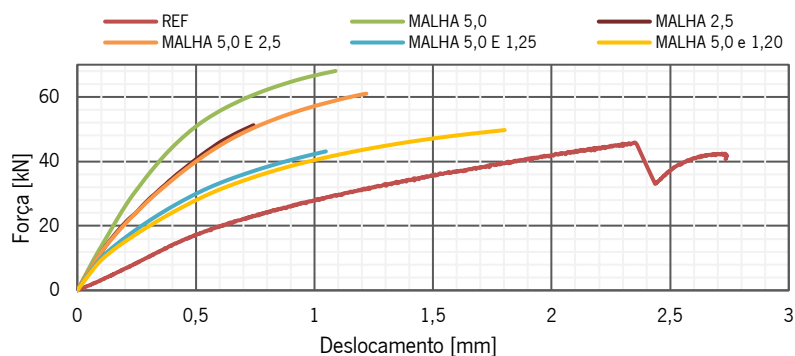


Figura 5.7 – Gráfico representativo de variação dos resultados com diferentes dimensões de malha

5.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA

De forma a manter as condições presentes quando da realização dos ensaios de flexão, as condições de fronteira foram definidas a partir da criação de um *load case*, do tipo *supports*, considerando a utilização de metade da geometria total do provete, realizando um travamento total na direção y, em todos os elementos, no eixo de simetria do modelo. Além dos travamentos no eixo de simetria, foram impostas condições de fronteira com restrição na vertical nos pontos de apoio, e com restrição no eixo x na extremidade e no eixo de simetria do perfil, evitando que ele se deslocasse nesse sentido, como pode ser observado na Figura 5.8.

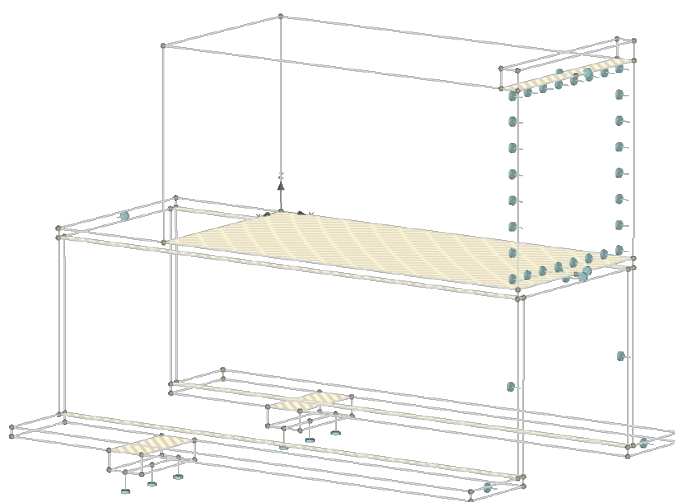


Figura 5.8 – Condições de apoio e fronteira impostas ao modelo criado

5.5. APLICAÇÃO DO CARREGAMENTO

Para o modelo base foram definidos dois *load cases*, sendo um deles para a aplicação das condições de fronteira e apoios, apresentado no tópico anterior, e um segundo para a aplicação de carregamento, do tipo *prescribed deformation*, onde, após as primeiras tentativas de aplicação de deslocamento pontual, que como dito anteriormente resultaram em deformações localizadas não desejadas, foi imposta uma deformação superficial de $1,0 \times 10^{-5} \text{ m/m}^2$, inserida na face superior do macroelemento criado para receber a aplicação de carga, responsável por impor a deformação sofrida pelo provete durante o ensaio.

5.6. PONTOS DE MONITORIZAÇÃO

Foram inseridos três pontos de monitorização no modelo, tal como os LVDTs dos ensaios, para que pudessem ser analisados os deslocamentos sucedidos pela viga, e um ponto de monitorização complementar para que fosse medida a carga imposta pelo deslocamento aplicado à viga.

Dada a necessidade de alteração do tipo de carregamento aplicado ao modelo, fez-se necessária a alteração do ponto de monitorização utilizado para medir o valor de carga aplicado, uma vez que tendo sido imposto um deslocamento linear à viga, não é possível a verificação da carga com a utilização de um ponto de monitorização naquele local, sendo necessário utilizar pontos nos elementos de apoio, e somar as cargas para que seja obtido o valor da carga aplicada.

Optou-se por fixar um ponto situado no meio de cada um dos macroelementos, onde ao impor-se condições de fronteira fixada no eixo z, se pode obter os valores de reação. Porém, a liberação da condição de fronteira superficial, sendo aplicada apenas a um ponto gerou uma deformação excessiva na região do apoio, mesmo com baixos valores de carga (25 kN), conforme se observa na Figura 5.9, sendo necessário que fossem alteradas as condições de fronteira dos elementos de apoio.

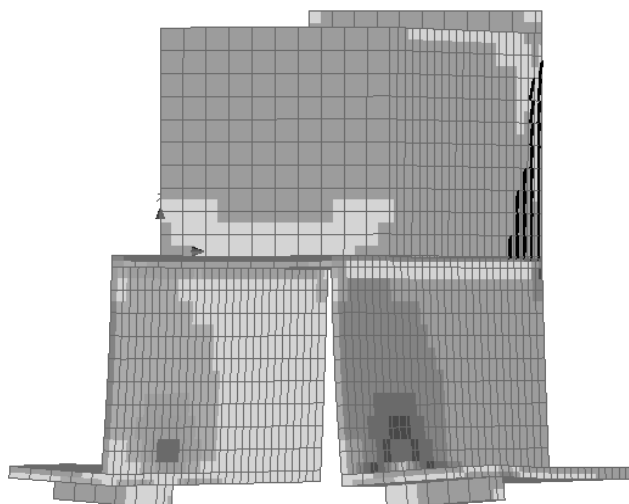


Figura 5.9 – Modelo com deformação excessiva na região dos apoios

Optou-se então por utilizar 3 restrições pontuais e equidistantes em relação ao eixo z em cada um dos apoios, onde foram inseridos 6 pontos de monitorização (3 em cada apoio) que quando somados resultam na carga total aplicada, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Cálculo da carga total aplicada utilizando os pontos de monitorização dos apoios

STEP	PONTOS DE MONITORIZAÇÃO						TOTAL
	E1	E2	E3	D1	D2	D3	
0	0	0	0	0	0	0	0
1	-0,118	0,248	0,660	-0,118	0,248	0,660	3,161
2	-0,248	0,526	1,279	-0,248	0,526	1,279	6,226
...
37	-3,038	6,120	9,242	-3,038	6,120	9,242	49,296
38	-3,056	6,127	9,362	-3,056	6,127	9,362	49,732

5.7. MÉTODO DE ANÁLISE E PASSOS DE INCREMENTO DE CARGA

A análise não linear pode ser realizada no Atena 3D através do método *Newton-Raphson* ou o método *Arc Length*. O método *Newton-Raphson* é recomendado quando se deseja determinar com precisão valores de carga, pois os deslocamentos são repetidos até atingir o equilíbrio, considerando a tolerância antecipadamente definida, e a força é incrementada sem alteração. No *Arc Length*, que também engloba os conceitos do método *Newton-Raphson*, há a alteração tanto do deslocamento quando da ação aplicada, sendo mais indicado para a fase de pós-pico [35].

Selecionou-se o método *Newton-Raphson* para resolver as equações de equilíbrio correspondentes a este modelo, assumindo os parâmetros associados ao método *Newton-Raphson Standard* foram definidos com base nos valores que por defeito o programa sugere, conforme apresentados na Figura 5.10.

Após escolher o método de análise e todos as etapas descritas anteriormente neste capítulo deve-se definir a sequência de carregamentos que será atribuída à estrutura. Nesta etapa, define-se a quantidade de incrementos que serão aplicados e seleciona-se qual método de análise a ser considerado em cada incremento aplicado. Também é possível determinar a magnitude destes incrementos de carga.

Para o modelo final atribuiu-se uma sequência de 38 etapas, com incremento de carga de 5x em todas as etapas, ou seja, o valor da deformação imposta foi multiplicado por 5, e esta deformação foi imposta por 38 vezes, uma após a finalização dos cálculos da deformação anterior.

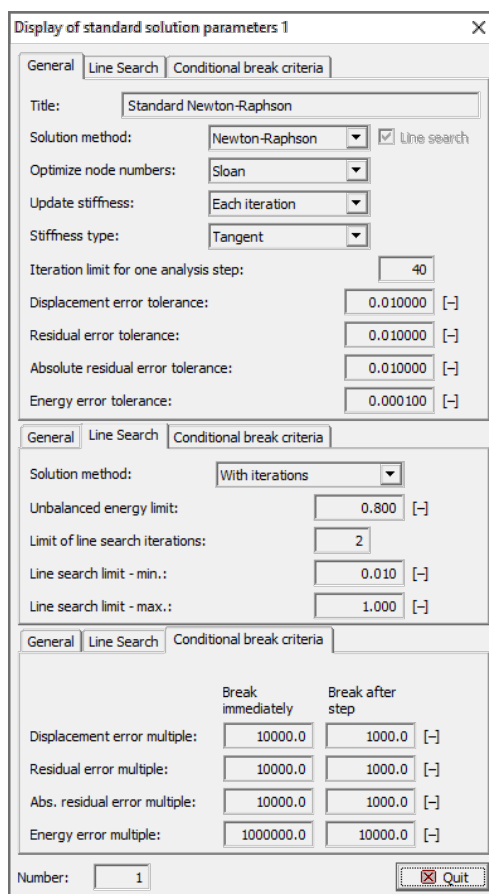


Figura 5.10 – Parâmetros de solução do método de análise Newton-Raphson

5.8. CALIBRAÇÃO DO MODELO

Considerando que não foram feitos ensaios específicos para que fosse possível determinar a rigidez da cola, bem como sua a tensão de aderência máxima quando utilizada no perfil e no betão dos provetes ensaiados, utilizou-se como ponto de partida as informações contidas na ficha técnica [33] fornecida pelo fabricante, utilizando valores de k_{tt} e k_{nn} entre 2×10^2 MN/m³ e 2×10^5 MN/m³, e f_c e C com valores definidos entre 4 MPa e 20 MPa. Os valores das propriedades do adesivo foram sendo ajustados em função dos resultados obtidos, a partir da comparação entre os valores de deslocamento (Figura 5.11) e escorregamento (Figura 4.13) que foram obtidos nos modelos numéricos e os correspondentes valores registados anteriormente nos ensaios experimentais.

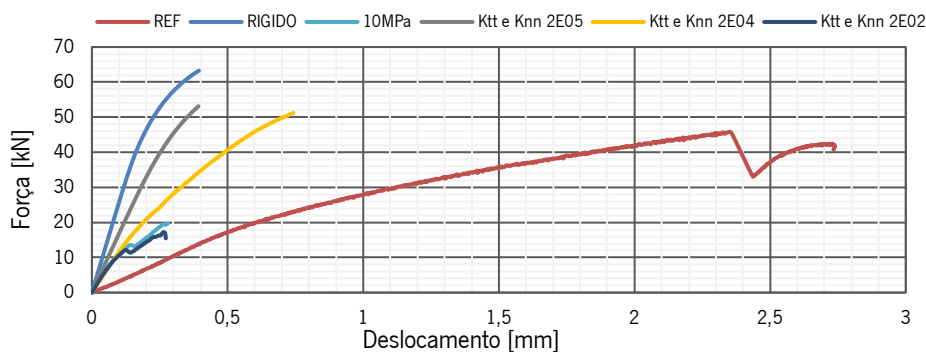


Figura 5.11 – Força vs. Deslocamento com diferentes propriedades (3D Interface)

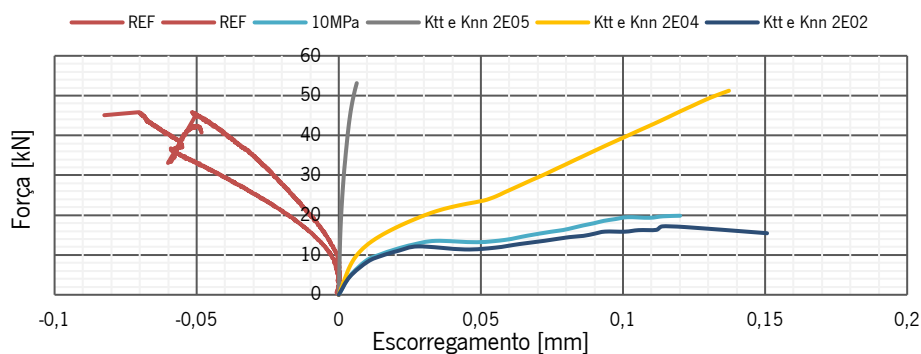


Figura 5.12 – Força vs. Escorregamento com diferentes propriedades (3D Interface)

Atentando-se a evitar situações de esgotamento da capacidade resistente atingindo baixos valores de carga, tal como nos casos em que foram utilizados os parâmetros k_{tt} e k_{nn} com valores de $2 \times 10^2 \text{ MN/m}^3$, e nos casos em que os parâmetros f_c e C com valores definidos como 4 MPa, casos em que além de ocorrer o esgotamento da capacidade resistente ainda abaixo dos 20 kN, geraram um padrão de fendilhação diferente dos observados nos ensaios realizados (Figura 5.13).

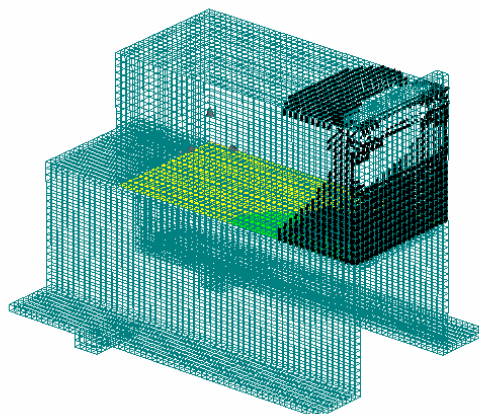


Figura 5.13 – Padrão de fendilhação de modelo com baixos valores de rigidez e resistência

Tendo em consideração que os valores de deformação do apoio medidos nos ensaios são de grandeza significativa e muito superior ao esperado, procurou-se obter uma melhor representação dos valores obtidos através dos ensaios, pelo que se procurou encontrar uma linha de tendência associada à curva de Força vs Deformação do Apoio, tal como se pode observar na Figura 5.14. Foi obtida uma equação polinomial de 2ª ordem (5.4), que foi utilizada para corrigir os valores de deformação medidos nos ensaios de flexão, de forma a isolar apenas a deformação sofrida pelo provete,

$$P = -52,847\Delta^2 + 102,011\Delta \quad (5.4)$$

Onde,

P é a carga [kN]

Δ é o deslocamento [mm]

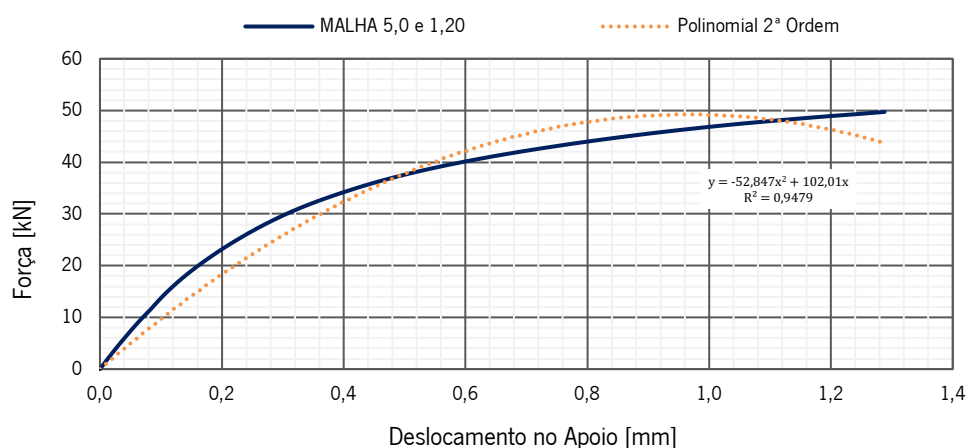


Figura 5.14 – Gráfico Força vs. Deslocamento no Apoio, com linha de tendência

Tendo em vista que o modelo apresentava um resultado mais rígido que o apresentado pelos provetes nos ensaios, realizaram-se algumas verificações feita nos provetes ensaiados, incluindo a medição mais rigorosa da espessura da chapa utilizada nos perfis, que é comercializada como com a espessura nominal de 2,5 mm. Após uma criteriosa avaliação dos perfis metálicos utilizados, comprovou-se uma espessura média de 2,4 mm, sendo feita também essa correção na geometria dos macroelementos que representam o perfil metálico, resultando num modelo final com comportamento conforme o que está representado no gráfico representado na Figura 5.15, juntamente com as curvas obtidas através dos ensaios, após serem corrigidas por meio da equação 5.4.

A curva apresenta um comportamento bastante semelhante às curvas obtidas experimentalmente, o que torna este trabalho de modelação numérica bastante relevante para que possa se obter o comportamento do provete diante do carregamento, sobretudo para que possa ser analisado o desempenho da cola como elemento de ligação.

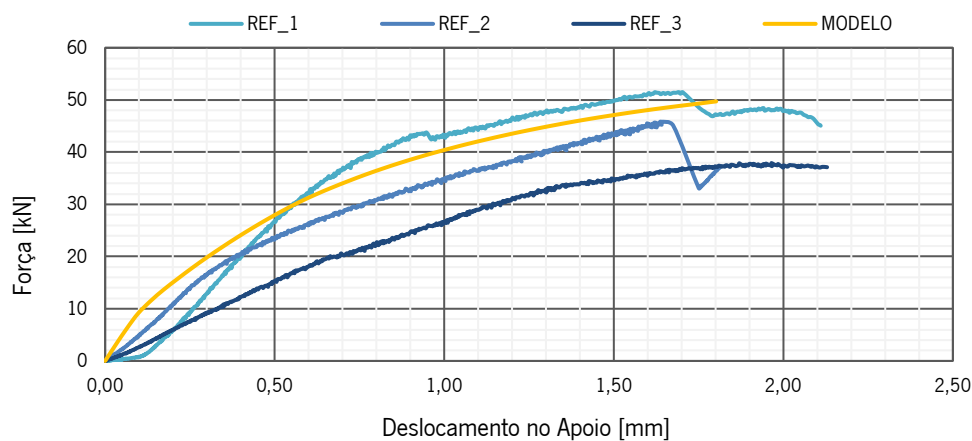


Figura 5.15 – Gráfico comparativo entre curva Força vs. Deslocamento dos provetes experimentais de referência e modelo numérico

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho realizou uma avaliação da durabilidade de elementos estruturais mistos em aço e betão, quando colados e submetidos a flexão, de onde se pretende obter, um maior entendimento sobre o comportamento da estrutura ao longo da vida útil, possibilitando desta forma realizar apontamentos no que diz respeito à implementação de novos materiais e soluções para a execução de estruturas mistas de aço-betão mais duráveis, e conseqüentemente mais sustentáveis.

O trabalho experimental realizado requereu um planeamento cuidadoso, que incluiu o tempo de cura dos elementos de betão, o tempo de cura da colagem, o tempo de exposição aos ambientes agressivos e até mesmo a realização dos ensaios, o que dificulta ajustes que eventualmente poderiam ter sido feitos, e que foram observados após a análise dos resultados obtidos.

Entretanto, uma análise dos resultados obtidos permitiu identificar que a durabilidade dos elementos estruturais mistos colados que foram objeto deste trabalho foi afetada quando os mesmos foram expostos aos ambientes agressivos propostos neste trabalho, principalmente após a exposição ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e à elevação da temperatura, ambientes que provocaram uma mudança de comportamento nos provetes, que ficou patente na curva força vs deslocamento, apontando para uma perda de efetividade da cola ao atingir forças da ordem de 30 kN, além de um padrão de fendilhação e rotura com orientação de 90 graus em relação ao eixo longitudinal do provete.

Os provetes que sofreram exposição à concentração de cloreto de sódio (NaCl) não sofreram tanto com esse efeito, mas após 60 dias de exposição também apresentaram certa perda de capacidade resistente, sofrendo fissuras com valores mais baixos de carga.

Acredita-se que o material utilizado para realizar a colagem entre os elementos de aço e betão possa ter tido um comportamento muito rígido, o que pode ter tido influência nos resultados apresentados e, desta forma, considerando os resultados obtidos, uma reanálise às dimensões

e propriedades dos materiais constituintes dos provetes aponta para que em trabalhos futuros, deve ser considerada, além da utilização de outras colas estruturais, novas dimensões e/ou geometrias para os provetes.

Outro fator importante seria limitar a deformação do provete na região do apoio, para que possam ser obtidos resultados de deformação devida flexão mais precisos.

Embora fossem identificados esses apontamentos, considera-se que os resultados obtidos são bastante relevantes, e que possibilitaram, recorrendo ao software ATENA 3D, o desenvolvimento de modelo numérico baseado no MEF, calibrado a partir de dados obtidos em ensaios experimentais de flexão em vigas, também realizados ao longo deste trabalho.

A fase de calibração do modelo foi um processo composto por várias etapas, onde se procurou explorar as potencialidades de modelação, com especial ênfase na modelação da interface (área de colagem) e na forma como esta pode ser representativa do comportamento experimental. Neste processo, houve cuidado em incluir todos os elementos que foram inseridos nos modelos experimentais, inclusive todos os LVDTs (Pontos de Monitorização no caso dos modelos). Após calibração, o modelo numérico obtido apresenta uma resposta semelhante à dos modelos experimentais e foi possível identificar as limitações que resultam da aplicação das leis constitutivas disponíveis no *software* utilizado.

Em conclusão, a componente mais importante do trabalho, qual seja a avaliação funcional das estruturas quando em situações desfavoráveis, para que possa ser avaliado o seu rendimento perante outras soluções construtivas sobre as quais já se conhece melhor tal comportamento, através da extensa literatura existente, considera-se que sistema avaliado mostrou-se apto para ser considerado e aplicado em construções correntes e eventualmente também em reforços estruturais. A partir da comprovação da eficácia destes modelos, foi possível avaliar medidas que melhoraram a capacidade resistente da solução e reduzem a quantidade de materiais utilizada, aliando o melhor desempenho com a sustentabilidade.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo avaliou o comportamento do modelo construtivo em foco, e obteve a sua validação numérica. Embora se tenha equiparado o comportamento dos modelos numéricos com os modelos experimentais, é necessário verificar a real contribuição de cada componente para o comportamento global do elemento estrutural. Com isso devem ser realizados:



-
- Ensaios experimentais que possibilitem caracterização deste e de outros tipos de adesivos estruturais, possivelmente por meio de ensaios do tipo *push-out*, utilizando betão semelhante e perfis também galvanizados;
 - Ensaios por flexão na viga mista considerando novas geometrias para o provete, ou enrijecimento na região do apoio, evitando deformação excessiva na área, possibilitando melhor análise do comportamento durante a flexão;
 - Considerar a utilização de outros tipos de betão, com soluções mais sustentáveis como a partir da utilização de agregados reciclados e cinzas volantes;
 - Considerar a utilização de perfis com diferentes acabamentos superficiais, buscando uma maior aderência entre a cola e o perfil.

A partir desta comprovação será possível realizar as alterações propostas a seguir com a certeza de que irão melhorar o sistema, de acordo com o objetivo desta investigação, e torná-lo mais apto para ser inserido em mercado sendo uma solução construtiva que poderá ser ainda mais utilizada seja na construção, ou no reforço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V.G.D. SILVA., Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica., Universidade de São Paulo, 2003.
- [2] V. JOHN, V. M., AGOPYAN, Durabilidade e Sustentabilidade: Desafios para a Construção Civil, Reserach Gate. 1 (2016) 11.
- [3] G.M.S. ALVA, M. MALITE, Comportamento Estrutural E Dimensionamento De Elementos Mistos Aço-Concreto, Cad. Eng. Estruturas São Carlos. 7 (2005) 51–84.
- [4] P. KUMAR, A. PATNAIK, S. CHAUDHARY, A review on application of structural adhesives in concrete and steel–concrete composite and factors influencing the performance of composite connections, Int. J. Adhes. Adhes. 77 (2017) 1–14. doi:10.1016/j.ijadhadh.2017.03.009.
- [5] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP En 206-1 Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Inst. Port. Da Qual. (2007).
- [6] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP EN 12620: Agregados para betão., Inst. Port. Da Qual. (2010) 61.
- [7] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP EN 13670-1 Execução de estruturas em betão - Parte 1: Regras gerais, Inst. Port. Da Qual. 2005 (2007).
- [8] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP EN 1994-1 Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão, Inst. Port. Da Qual. (2011) 130.
- [9] ASTM, C 88-05 - Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, Annu. B. Am. Soc. Test. Mater. ASTM Stand. i (2005) 1–5. doi:10.1520/C0088-05.2.
- [10] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP EN 12390-3 Ensaios do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes, Inst. Port. Da Qual. (2009) 21.
- [11] S.R.L. DA CUNHA, Desenvolvimento de sistemas construtivos sustentáveis com base em materiais com propriedades térmicas e fotocatalíticas, Universidade do Minho, 2018.
- [12] R.D.S. LIMA, Efeito do ciclo de molhagem e secagem na resistividade elétrica superficial

- e na resistência à compressão do concreto: simulação da agressividade marinha, UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, 2017.
- [13] ABNT, NBR 15575-1 – Desempenho. Parte 1 : Requisitos gerais, Assoc. Bras. Normas Técnicas. (2013) 60.
- [14] ISO (INTERNATIONAL STANDARIZATION ORGANIZATION), ISO 15686-1 Buildings and constructed assets – Service Life Planning –Part 1: General principles, (2000).
- [15] A. COSTA, Reabilitação e reforço de estruturas, Inst. Super. Técnico. (n.d.).
- [16] J. pires B.D. SILVA, Vidas Úteis Em Elementos Da Construção, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [17] C.A.D.S. LOPES, Durabilidade na Construção - Estimativa da vida útil de revestimentos cerâmicos de fachadas, Universidade do Porto, 2009.
- [18] M.. H. CORVACHO, Durabilidade da Construção. Metodologia do projecto para a durabilidade. Planeamento da vida útil de um edifício., in: FEUP, Porto, n.d.
- [19] J.F. BERTHET, I. YURTDAS, Y. DELMAS, A. LI, Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test, Int. J. Adhes. Adhes. 31 (2011) 75–83. doi:10.1016/j.ijadhadh.2010.11.004.
- [20] M. BEGUM, M. SERAJUS SALEKIN, N.M. TAUHID BELEL KAHN, W. AHMED, Cost analysis of steel concrete composite structures in Bangladesh, Asian J. Civ. Eng. 14 (2013) 935–944.
- [21] R.A. BARNES, G.C. MAYS, The transfer of stress through a steel to concrete adhesive bond, Int. J. Adhes. Adhes. 21 (2001) 495–502. doi:10.1016/S0143-7496(01)00031-8.
- [22] O. VOLKERSEN, Die Nietkraftverteilung in zugbean spruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten, (1938) 15:41–7.
- [23] KUMAR, P., Experimental investigations for shear bond strength of steel and concrete bonded by epoxy, 2013.
- [24] P. KUMAR, S. CHAUDHARY, R. GUPTA, Behaviour of Adhesive Bonded and Mechanically Connected Steel-concrete Composite under Impact Loading, Procedia Eng. 173 (2017) 447–454. doi:10.1016/j.proeng.2016.12.062.

- [25] Y. MAJDI, C. HSU, S. PUNURAI, Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete, *Eng. Struct.* 69 (2014) 271–284. doi:10.1016/j.engstruct.2014.03.025.
- [26] C. HSU, P. MUNOZ, S. PUNURAI, Y. MAJDI, W. PUNURAI, Behavior of composite beams with cold-formed steel joists and concrete slab, in: 21st Int. Spec. Conf. Cold-Formed Steel Struct., St. Louis, n.d.: p. 2012.
- [27] C. HSU, S. PUNURAI, W. PUNURAI, Y. MAJDI, New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab, *Eng. Struct.* 71 (2014) 187–200. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.04.011.
- [28] J. DAI, T. UEDA, Y. SATO, Development of the non-linear bond stress–slip model of fiber reinforced plastics sheet–concrete interfaces with a simple method, . . *J Compos Constr ASCE*. (2005).
- [29] CEN (COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO), NP EN 1504-4 Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão - Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade - Parte 4: Colagem estrutural, *Inst. Port. Da Qual.* (2006).
- [30] SECIL - COMPANHIA GERAL DE CAL E CIMENTO, CEM I 42,5 R Cimento Portland, *CEM I 42,5* (2004) 197–198.
- [31] BRITAMINHO - GRANITOS E BRITAS DO MINHO, Certificado CE - Serigrafia, (n.d.).
- [32] BASF - THE CHEMICAL COMPANY, MasterGlenium SKY 617, 2014.
- [33] SIKA, Sikadur -31 EF, (2018) 2–5.
- [34] ISO (INTERNATIONAL STANDARIZATION ORGANIZATION), ISO 6892-1 Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature 1, *Met. Mater.* 2009 (2009) 64.
- [35] T.L. SILVA, Estudo numérico sobre sistemas de conexão destinados a pavimentos mistos em aço e betão, Universidade do Minho, 2018.
- [36] A.F.M. AZEVEDO, *O Metodo Dos Elementos Finitos.*, 1ª Edição, Universidade do Porto, Porto, 2003.
- [37] V. ČERVENKA, L. JENDELE, J. ČERVENKA, ATENA Program Documentation Part 4-2

-
- Tutorial for Program ATENA 3D, Cerv. Consult. (2016) 1–165.
- [38] V. ČERVENKA, L. JENDELE, J. ČERVENKA, ATENA Program Documentation Part 1 Theory, Atena. (2012) 1–282.
- [39] CEB-FIB, Model Code 2010 - First complete draft - Volume 1, 2011. doi:10.1002/9783433604090.ch6.

ANEXO A1

▪ FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA DOSAGEM DE BETÃO SEGUNDO O MÉTODO DE FAURY

Com a finalidade de facilitar a composição e dosagem do betão a ser utilizado, a ferramenta foi desenvolvida em software Microsoft Excel pelo Professor Dr. Aires de Camões, e adaptada às necessidades específicas deste projeto pelo autor.

As figuras a seguir são representações de imagens retiradas a ferramenta.

Composição de Betões - Método de Faury

1 - Materiais inertes					
Peneiro	mm	% Retidos Acumulados			Pó fino
		Brita 6 - 12	Brita 4 - 8	Areia 0 - 4	
63,0		0,00	0,00	0,00	0,00
31,5		0,00	0,00	0,00	0,00
16,0		0,00	0,00	0,00	0,00
8,0		0,00	7,00	0,00	0,00
4,0		0,00	89,00	8,00	0,00
2,0		0,00	97,00	32,00	0,00
1,0		0,00	98,00	53,00	0,00
0,5		0,00	99,00	68,00	0,00
0,25		0,00	99,00	78,00	0,00
0,125		0,00	99,00	89,00	0,00
0,063		0,00	99,00	97,00	0,00
Absorção de Água (%)		0,40%	0,60%	0,20%	2,86%
Humidade (%)		0,00%	0,76%	0,00%	0,00%
Massa Volúmica (kg/m ³)		2640	2640	2660	2532
D _{máx.} (ASTM)		0,06	8,00	4,00	0,06
Módulo Finura		0,00	5,83	3,93	0,00

2 - Ligantes				
	Designação	γ (kg/m ³)	Dosagem (kg/m ³)	% adição
Cimento	CEM I 42,5 R	3100	360	-
Cinza volante	Pego	2362	0	
Silica de fumo	MBT	2300	0	

% de adição = adição/(cimento + Σ adições) volume de ligantes (c) 0,116129032 m³

Figura A1.1 – Passos 1 e 2



3 - Volume de Vazios

ACI 613	
D _{max} (mm)	V _v (L/m ³)
9,53	30
12,7	25
19,1	20
25,4	15
38,1	10
50,8	5
76,2	3

Valor adoptado (L/m³) **30**

4 - Água de Amassadura

Razão água/ligante - w_t/c **0,38**

Wt(L/m³) **136,80**

Wt - água total
 C - cimento
 CV - cinza volante
 SF - sílica de fumo

Volume de inertes (m) $m = 1.0 - c - w - v_v$ 0,717070968 m³
 Percentagem de ligante $p_e = c / (c + m)$ 0,139377139 %

5 - Adjuvantes

Superplastificante (SP)	Teor de Sólidos	(sól.SP)/(C+CV+SF)	Dosagem (kg/m ³)
MasterGlenium SKY 617	18,0%	1,5%	30,00

Adjuvante		Dosagem (kg/m ³)
Designação	Tipo	

Figura A1.2 – Passos 3, 4 e 5

6 - Parâmetros da Curva de Faury

Consistência	Meios de Compactação	Valores de A			Valores de B
		Natureza dos Inertes		Areia e Inerte grosso britado	
		Inerte grosso rolado	Inerte grosso britado		
Terra Húmida	Vibração muito potente e possível compressão (pré-fabricação)	≤18	≤19	≤20	1
Seca	Vibração potente (pré-fabricação)	20 a 21	21 a 22	22 a 23	1 a 1,5
Plástica	Vibração média	21 a 22	23 a 24	25 a 26	1,5
Mole	Apiloamento	28	30	32	2
Fluida	Espalhamento e compactação pelo peso próprio	32	34	38	2

VALORES ADOTADOS

A

B

32

2

$y_{D2} = 65,767182$

7 - Raio Médio do Molde

R(mm) = **8,00**

Figura A1.3 – Passos 6 e 7

8 - Resultados dosagens para 30% de brita 0,5 e 70% de fracção fina

Peneiro	% Retidos acumulados			
	mm	c+m	m	m*
63,000	0,00	0,00	0,00	0,00
31,500	0,00	0,00	0,00	0,00
16,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8,000	0,00	0,00	0,00	2,45
4,000	34,23	39,78	36,32	36,32
2,000	46,00	53,46	54,50	54,50
1,000	56,25	65,36	68,30	68,30
0,500	65,17	75,73	78,26	78,26
0,250	72,94	84,75	84,66	84,66
0,125	79,70	92,61	91,71	91,71
0,063	85,53	99,38	96,83	96,83
D _{máx.} (ASTM)	8,00	8,00	8,00	8,00
Módulo Finura	3,94	4,58	4,56	4,56

c+m - curva teórica de Faury: ligantes + material inerte
 m - curva teórica de Faury: material inerte
 m* - curva real: material inerte

Material a Introduzir na Mistura

Material	Dosagens por m ³ de Betão	Dosagens para uma amassadura de (L):
Cimento	360,00 kg	7,2000 kg
Cinza volante		
Sílica de fumo		
Brita 6 - 12	0,00 kg	0,0000 kg
Brita 4 - 8	678,00 kg	13,5599 kg
Areia 0 - 4	1229,45 kg	24,5890 kg
Pó fino	0,00 kg	0,0000 kg
MasterGlenium SKY 617	30,00 kg	0,6000 kg
W	113,5513 L	2,2710 L

20 L

W (água a introduzir na mistura) = $W_t - (1 - \%SP) \times SP - \%H.I. \times m + \%A.I. \times m$

%SP - teor de sólidos do SP
 %H.I. - humidade dos inerte
 %A.I. - absorção de água dos inertes

Figura A1.4 – Passo 8 e dosagem final

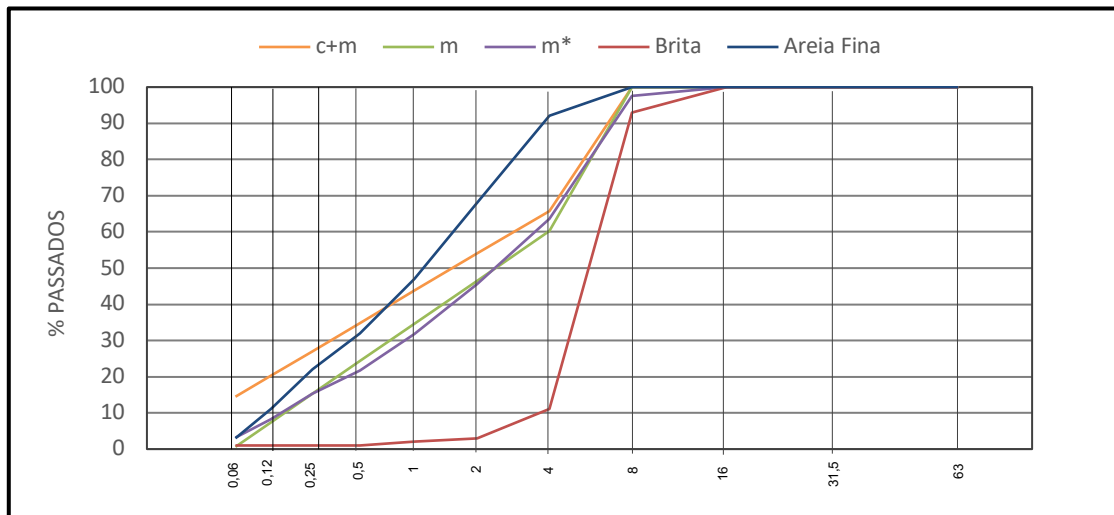


Figura A1.5 – Gráfico representativo da curva granulométrica

ANEXO A2

▪ FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CÁLCULO DA SECÇÃO MISTA

Com a finalidade de facilitar a comparação entre os possíveis perfis metálicos a serem utilizados, a ferramenta foi desenvolvida em software Microsoft Excel, onde através de macros a ferramenta realiza a verificação do perfil misto segundo as indicações da NP EN 1994-1 de 2011, mais conhecida como EUROCODE 4.

As figuras a seguir são representações de imagens retiradas a ferramenta.

SECÇÃO DE BETÃO

b_c	50,0 [mm]
h_c	50,0 [mm]
F_{ok}	55,6 [MPa]
E_c	35,0 [GPa]
A_c	2500,0 [mm ²]
I_c	520833 [mm ⁴]
F_c	118,2 [kN]
n	6,0 []

SECÇÃO DE AÇO

SELECIONAR PERFIL ↓
TQ50x50x3,0

F_y	260,0 [MPa]
E_y	210,0 [GPa]
h_a	50,0 [mm]
A_a	800,0 [mm ²]
Z_a	25,0 [mm]
I_a	190500,0 [mm ⁴]
b_a	50,0 [mm]

SECÇÃO MISTA AÇO-BETÃO

H_{TOTAL}	102,0 [mm]
Vão	210,00 [mm]
A_M	1216,7 [mm ²]
I_M	1018698 [mm ⁴]
Z_M	42,1 [mm]
h_{cola}	2,0 [mm]
D_{cola}	50 [mm]

Elxo Neutro no Aço! OK

ANÁLISE PLÁSTICA	A_c	I_c	F_c	Z (mm)	$M_{pl,R}$	P_{pl}	$t_{max,pl}$	
Análise(pl)	TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	29,5 [MPa]

ANÁLISE ELÁSTICA	A_c	I_c	F_c	Z (mm)	$M_{el,R}$	P_{el}	$t_{max,el}$	
Análise(el)	TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [kN]	42,1 [mm]	5,7 [kNm]	108,1 [kN]	15,4 [MPa]

COMPARAÇÃO	A_c	I_c	F_c	Z (mm)	$M_{pl,R}$	P_{pl}	$t_{max,pl}$
Análise(el) D90x50x1,5	259,5 [mm ²]	96843 [mm ⁴]	67,5 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	NOT OK [MPa]
Análise(el) D90x50x2,0	351,2 [mm ²]	129146 [mm ⁴]	91,3 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	NOT OK [MPa]
Análise(el) D90x80x1,5	366,1 [mm ²]	327472 [mm ⁴]	95,2 [kN]	73,3 [mm]	4,6 [kNm]	88,5 [kN]	9,9 [MPa]
Análise(el) D90x80x2,0	494,3 [mm ²]	438909 [mm ⁴]	128,5 [kN]	67,8 [mm]	6,1 [kNm]	116,2 [kN]	12,6 [MPa]
Análise(el) D90x80x2,5	623,8 [mm ²]	549442 [mm ⁴]	162,2 [kN]	63,4 [mm]	7,5 [kNm]	143,7 [kN]	15,0 [MPa]
Análise(el) D90xArx50x1,5	306,1 [mm ²]	119003 [mm ⁴]	79,6 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	NOT OK [MPa]
Análise(el) D90xArx50x2,0	415,1 [mm ²]	155145 [mm ⁴]	107,9 [kN]	48,4 [mm]	4,5 [kNm]	85,5 [kN]	11,4 [MPa]
Análise(el) D90xArx50x2,5	526,2 [mm ²]	188178 [mm ⁴]	136,8 [kN]	45,0 [mm]	5,8 [kNm]	110,1 [kN]	14,7 [MPa]
Análise(el) C100x42x1,5	305,2 [mm ²]	82453 [mm ⁴]	79,6 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	NOT OK [MPa]
Análise(el) TR50x30x3,0	480,0 [mm ²]	57000 [mm ⁴]	124,8 [kN]	NOT OK [mm]	NOT OK [kNm]	NOT OK [kN]	NOT OK [MPa]
Análise(el) TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [kN]	42,1 [mm]	5,5 [kNm]	105,6 [kN]	15,0 [MPa]

CATALOGO DE PERFIS	Perfil	b_c [mm]	h_c [mm]	A_c [mm ²]	Z_c [mm]	I_c [mm ⁴]
D90x50x1,5	40,0	50,0	259,5	22,9	96843,4	
D90x50x2,0	40,0	50,0	351,2	22,1	129146,2	
D90x50x2,5	40,0	50,0	444,3	21,4	160730,6	
D90x50x3,0	40,0	50,0	538,7	20,7	191453,4	
D90x80x1,5	45,0	80,0	366,1	37,2	327471,7	
D90x80x2,0	45,0	80,0	494,3	36,4	438908,5	
D90x80x2,5	45,0	80,0	623,8	35,6	549441,9	
D90x80x3,0	45,0	80,0	754,8	34,7	658774,5	
D90xArx50x1,5	50,0	50,0	306,1	22,1	119002,9	
D90xArx50x2,0	50,0	50,0	415,1	21,6	155145,3	
D90xArx50x2,5	50,0	50,0	526,2	21,2	188177,9	
D90xArx50x3,0	50,0	50,0	639,4	20,9	218002,6	
C100x42x1,5	100,0	42,0	306,2	27,7	82492,8	
C100x42x2,0	100,0	42,0	406,0	28,0	106398,9	
C100x42x2,5	100,0	42,0	503,2	28,2	128543,7	
C100x42x3,0	100,0	42,0	597,8	28,5	148119,3	
TR50x30x3,0	50,0	30,0	480,0	15,0	57000,0	
TR50x30x4,0	50,0	30,0	640,0	15,0	66900,0	
TQ50x50x3,0	50,0	50,0	800,0	25,0	190500,0	
TQ50x50x4,0	50,0	50,0	800,0	25,0	237000,0	
TQ40x40x3,0	40,0	40,0	480,0	20,0	93200,0	
TQ40x40x4,0	40,0	40,0	640,0	20,0	111000,0	
TQ40x40x1,5	40,0	40,0	240,0	20,0	88281,0	

Figura A2.1 – Visão geral da ferramenta computacional

SECÇÃO DE BETÃO

b_c	50,0 [mm]
h_c	50,0 [mm]
F_{ok}	55,6 [MPa]
E_c	35,0 [GPa]
A_c	2500,0 [mm ²]
I_c	520833 [mm ⁴]
F_c	118,2 [kN]
n	6,0 []

SECÇÃO DE AÇO

SELECIONAR PERFIL ↓
TQ50x50x3,0

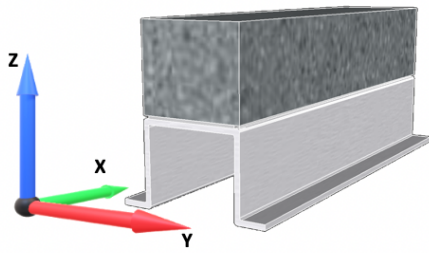
F_y	260,0 [MPa]
E_y	210,0 [GPa]
h_a	50,0 [mm]
A_a	800,0 [mm ²]
Z_a	25,0 [mm]
I_a	190500,0 [mm ⁴]
b_a	50,0 [mm]

SECÇÃO MISTA AÇO-BETÃO

H_{TOTAL}	102,0 [mm]
Vão	210,00 [mm]
A_M	1216,7 [mm ²]
I_M	1018698 [mm ⁴]
Z_M	42,1 [mm]
h_{cola}	2,0 [mm]
D_{cola}	50 [mm]

Elxo Neutro no Aço! OK

Figura A2.2 – Detalhamento das secções de Betão, Aço e Mista Aço-Betão



CATALOGO DE PERFIS					
Perfil	b _o [mm]	h _o [mm]	A _o [mm ²]	Z _o [mm]	I _o [mm ⁴]
Ω90°x50x1,5	40,0	50,0	259,5	22,9	96843,4
Ω90°x50x2,0	40,0	50,0	351,2	22,1	129146,2
Ω90°x50x2,5	40,0	50,0	444,3	21,4	160730,6
Ω90°x50x3,0	40,0	50,0	538,7	20,7	191453,4
Ω90°x80x1,5	45,0	80,0	366,1	37,2	327471,7
Ω90°x80x2,0	45,0	80,0	494,3	36,4	438908,5
Ω90°x80x2,5	45,0	80,0	623,8	35,6	549441,9
Ω90°x80x3,0	45,0	80,0	754,8	34,7	668774,5
Ω90°ARx50x1,5	50,0	50,0	306,1	22,1	119002,9
Ω90°ARx50x2,0	50,0	50,0	415,1	21,6	155145,3
Ω90°ARx50x2,5	50,0	50,0	526,2	21,2	188177,9
Ω90°ARx50x3,0	50,0	50,0	639,4	20,9	218002,6
C100x42x1,5	100,0	42,0	306,2	27,7	82492,8
C100x42x2,0	100,0	42,0	406,0	28,0	106398,9
C100x42x2,5	100,0	42,0	503,2	28,2	128243,7
C100x42x3,0	100,0	42,0	597,8	28,5	148119,3
TR50x30x3,0	50,0	30,0	480,0	15,0	57000,0
TR50x30x4,0	50,0	30,0	640,0	15,0	66900,0
TQ50x50x3,0	50,0	50,0	800,0	25,0	190500,0
TQ50x50x4,0	50,0	50,0	800,0	25,0	237000,0
TQ40x40x3,0	40,0	40,0	480,0	20,0	93200,0
TQ40x40x4,0	40,0	40,0	640,0	20,0	111000,0
TQ40x40x1,5	40,0	40,0	240,0	20,0	88281,0

Figura A2.3 – Catálogo de perfis utilizados na comparação

ANÁLISE PLÁSTICA									ANÁLISE PLÁSTICA
Análise(pl)	A _a	I _a	F _y	Z (en)	M _{Rd}	P _{rd}	t _{max(pl)}		
TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	29,5 [MPa]		

ANÁLISE ELÁSTICA									ANÁLISE ELÁSTICA
Análise(el)	A _a	I _a	F _y	Z (en)	M _{Rd}	P _{rd}	t _{max(el)}		
TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [KN]	42,1 [mm]	5,7 [KNm]	108,1 [KN]	15,4 [MPa]		

COMPARAÇÃO									CLEAR
Análise(e)	A _a	I _a	F _y	Z (en)	M _{Rd}	P _{rd}	t _{max}		
Análise(e) Ω90°x50x1,5	259,5 [mm ²]	96843 [mm ⁴]	67,5 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	NOT OK [MPa]		
Análise(e) Ω90°x50x2,0	351,2 [mm ²]	129146 [mm ⁴]	91,3 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	NOT OK [MPa]		
Análise(e) Ω90°x80x1,5	366,1 [mm ²]	327472 [mm ⁴]	95,2 [KN]	73,3 [mm]	4,6 [KNm]	88,5 [KN]	9,9 [MPa]		
Análise(e) Ω90°x80x2,0	494,3 [mm ²]	438909 [mm ⁴]	128,5 [KN]	67,8 [mm]	6,1 [KNm]	116,2 [KN]	12,6 [MPa]		
Análise(e) Ω90°x80x2,5	623,8 [mm ²]	549442 [mm ⁴]	162,2 [KN]	63,4 [mm]	7,5 [KNm]	143,7 [KN]	15,0 [MPa]		
Análise(e) Ω90°ARx50x1,5	306,1 [mm ²]	119003 [mm ⁴]	79,6 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	NOT OK [MPa]		
Análise(e) Ω90°ARx50x2,0	415,1 [mm ²]	155145 [mm ⁴]	107,9 [KN]	48,4 [mm]	4,5 [KNm]	85,5 [KN]	11,4 [MPa]		
Análise(e) Ω90°ARx50x2,5	526,2 [mm ²]	188178 [mm ⁴]	136,8 [KN]	45,0 [mm]	5,8 [KNm]	110,1 [KN]	14,7 [MPa]		
Análise(e) C100x42x1,5	306,2 [mm ²]	82493 [mm ⁴]	79,6 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	NOT OK [MPa]		
Análise(e) TR50x30x3,0	480,0 [mm ²]	57000 [mm ⁴]	124,8 [KN]	NOT OK [mm]	NOT OK [KNm]	NOT OK [KN]	NOT OK [MPa]		
Análise(e) TQ50x50x3,0	800,0 [mm ²]	190500 [mm ⁴]	208,0 [KN]	42,1 [mm]	5,5 [KNm]	105,6 [KN]	15,0 [MPa]		

Figura A2.4 – Resultado das análises plástica e elástica, com quadro comparativo entre perfis