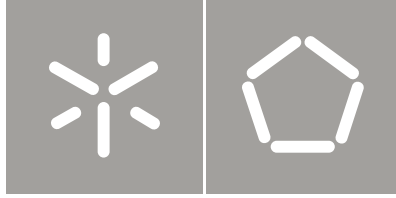




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Miguel Souto Campos

Desenvolvimento de sistemas experimentais
para estudo do comportamento do betão sob
condições de retração restringida



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Miguel Souto Campos

Desenvolvimento de sistemas experimentais
para estudo do comportamento do betão sob
condições de retração restringida

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Miguel Azenha

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Miguel Azenha agradeço toda a ajuda prestada ao longo da dissertação. Pretendo também agradecer especialmente ao Christoph de Sousa pela atenção e pelo apoio prestado na explicação de informações que me eram desconhecidas.

Aos meus pais, Paulo Campos e Márcia Souto, pelos esforços que fizeram para me proporcionarem concluir os estudos. Agradeço, ainda a Cláudia Souto pela ajuda prestada, bem como aos meus restantes familiares.

Aos meus amigos, em especial Jorge Rebelo e Henrique Oliveira, e Catarina Guimarães agradeço pelos momentos passados e pela confiança depositada. Estou igualmente grato a todos os amigos que me acompanharam na universidade, entre os quais a Inês Alves, Paula Neto, Vanessa Sequeira e Jorge Enes.

Por último, agradeço às empresas Bysteel e Vialam pela ajuda proporcionada e pelos dispositivos oferecidos.

RESUMO

As estruturas de betão estão, ao longo da sua vida, sujeitas a variações de volume, provocadas por diversos efeitos, tal como a retração e as mudanças de temperatura. No caso de estruturas cujas deformações volumétricas se encontram parcial ou totalmente restringidas, geram-se esforços internos associados às deformações impostas. Dado que estes esforços internos correspondem frequentemente a trações e atingem a capacidade resistente do betão, ocorre fissuração. A armadura necessária para controlo da abertura destas fendas é frequentemente significativa, acarretando também custos relevantes. De facto, a regulamentação existente para definição da armadura de controlo da retração (p.ex. CEN (2004a)) é extremamente simplificada e muitas vezes conservativa. Por outro lado, é ainda inexistente regulamentação, recomendações, ou até trabalhos científicos relativos ao controlo de fissuração de retração com o uso combinado de armaduras convencionais e fibras discretas. Tendo em conta a especial adequabilidade do uso de fibras discretas para apoio ao controlo de fissuração, considerou-se que esta era uma relevante oportunidade de investigação para a presente dissertação.

Neste contexto o estudo das estruturas impedidas de se deformarem envolve uma complexa interação entre a retração e a fluência. Para a compreensão destas componentes é frequente recorrer-se a ensaios de restrição ativa à deformação, cujo processo envolve a utilização de dispositivos que permitam controlar o grau de restrição num provete, impedindo-o de retrair livremente (normalmente designados por *TSTM*, *Temperatura Stress Testing Machine*). No decorrer da dissertação, serão apresentados vários sistemas de ensaio, dando especial atenção aos atuadores e sistemas de medição utilizados. A dissertação compreende também uma revisão bibliográfica detalhada sobre sistemas atuadores alternativos aos normalmente utilizados (hidráulicos), com o propósito de acarretarem custos mais reduzidos. No contexto desta dissertação são reportadas alterações ao sistema de ensaio existente na Universidade do Minho, desenvolvido por De Sousa (2011), preparado para a condução de ensaios sobre provetes de betão simples e armado, denominado por *VRF*, *Variable Restraint Frame*. As alterações envolveram a elaboração de um novo sistema de medição de deformações, um novo molde e a validação do comportamento do cilindro hidráulico utilizado. Posteriormente, é apresentado um novo sistema, análogo ao *VRF*, com a particularidade de envolver a reutilização de peças existentes no laboratório da U.M. e permitir encurtar os custos associados. O sistema utiliza como atuador o aperto/desaperto de uma ligação parafuso-porca e a medição das deformações é executada através da captação de imagens, por parte de um microscópio USB, dum sistema de lamelas micrométricas sobrepostas.

Palavras-chave: Retração, fluência, ensaios de restrição ativa, atuador, sistema de medição

ABSTRACT

The concrete structures are, throughout their life, subject to changes in volume caused by various effects such as the shrinkage and temperature variations. In the case of volumetric structures whose deformations are partially or fully restricted, internal stresses are generated associated with the imposed deformations. Since these internal stresses often correspond to tensile forces and reach the bearing capacity of the concrete, cracking occurs. The reinforcement needed to control the opening of these cracks is often significant, also causing substantial costs. Indeed, the existing codes of reinforcement to control shrinkage regulation (eg: CEN (2004a)) is extremely simplified e often conservative. On the other hand, is still missing regulations, recommendations, or even scientific studies concerning the shrinkage cracking control with the combined use of conventional reinforcements and discrete fibers. Given the particular the special use of discrete fibers to assist in the control cracking, it was considered that this was a relevant research opportunity for this thesis.

In this context the study of structures restrained to deforming involves a complex interaction between shrinkage and creep. For the understanding of these components often are used tests of active restraint to deformation, whose process involves the use of devices which control the degree of restriction in a specimen, preventing it of shrink freely (usually designated as *TSTM*, *Temperature Stress Testing Machine*). A number of test systems will be presented, with special regard to the use of loading and measurement systems, during the dissertation. The dissertation includes a detailed literature review on alternative loading systems to those usually used (hydraulics), with the purpose of igniting lower costs. In the context of this thesis will be reported changes to the existing test system developed by De Sousa (2011) at Universidade do Minho, prepared to conduct tests on specimens of plain and reinforced concrete, called *VRF*, *Variable Restraint Frame*. The changes wrapped the development of a new system for strain measurement, a new mold and validation of the behavior of the hydraulic cylinder used. Posteriorly, a new system is presented, analogous to *VRF*, with the peculiarity of involving the reuse of existing parts in the U.M. lab and allow shortening the costs. The system uses as loading the tightening / loosening of a screw-nut connection and the measurement of the deformation is performed through capturing images, by a USB microscope, of a system of overlapping micrometric lamellae.

Keywords: Shrinkage, creep, active restraint tests, loading system, measurement system

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 ENSAIOS DE RESTRIÇÃO ATIVA À DEFORMAÇÃO.....	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Sistemas de restrição ativa à deformação para betão simples	7
2.3 Sistemas de restrição ativa à deformação para betão armado	14
2.4 Análise ao sistema desenvolvido na U.M.	20
3 SISTEMAS ATUADORES APLICADOS AOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA.....	28
3.1 Atuadores hidráulicos.....	28
3.2 Atuadores com molas	31
3.3 Atuadores com engrenagens	40
3.4 Atuadores de aperto manual.....	47
4 ADAPTAÇÕES E EXTENSÕES AO SISTEMA DE RESTRIÇÃO ATIVA À DEFORMAÇÃO EXISTENTE NA U.M.....	54
4.1 Adaptações ao sistema para ensaio de provetes não armados	55

4.1.1	Molde.....	55
4.1.2	Atuador Hidráulico.....	59
4.1.3	Sistema de medição de deformações.....	65
4.2	Sistema variante para ensaio de provetes armados	77
4.2.1	Atuador	77
4.2.2	Sistema de medição de deformações.....	95
4.2.3	Ensaio piloto	103
5	CONCLUSÃO.....	110
5.1	Conclusões gerais	110
5.2	Desenvolvimentos futuros.....	112
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
7	ANEXOS.....	115
7.1	Dedução da expressão desenvolvida por Cusson e Hoogeveen (2006)	115
7.2	Dedução da expressão utilizada para o cálculo do esforço axial através da deformação	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Exemplificação de um ciclo de ensaio de restrição ativa.....	6
Figura 2.2- Representação esquemática das tensões e deformações num ensaio de restrição ativa....	7
Figura 2.3- Sistema de ensaio desenvolvido por Paillère e Serrano (1976)	8
Figura 2.4- Sistema desenvolvido por Paillère et al. (1989).....	8
Figura 2.5- Sistema de ensaio desenvolvido por Bloom e Bentur (1993)	9
Figura 2.6- Sistema de ensaio desenvolvido por Springenschmid et al. (1994)	10
Figura 2.7- Sistema de ensaio desenvolvido por Kovler (1994).....	11
Figura 2.8- Desenho esquemático do sistema de ensaio desenvolvido por Aly et al. (2008).....	12
Figura 2.9- Sistema de ensaio desenvolvido por Aly e Sanjayan (2010)	12
Figura 2.10- Esquema representativo das deformações que ocorrem durante ensaio de restrição ativa desenvolvido por Kovler (1994)	14
Figura 2.11- Sistema de ensaio desenvolvido por Sule e Breugel (2001)	15
Figura 2.12- Sistema de ensaio desenvolvido por Cusson e Hooeveen (2006)	15
Figura 2.13- Sistema de ensaio desenvolvido por Teixeira et al. (2012) a) Antes da betonagem; b) Depois da betonagem	16
Figura 2.14- Sistema de ensaio VRF desenvolvido por De Sousa (2011).....	20
Figura 2.15- Pormenor dos parafusos embebidos no provete, chapa de base e geometria alargada da extremidade, por De Sousa (2011).....	21
Figura 2.16- Desenho esquemático do provete de betão armado utilizado por De Sousa (2011)	22
Figura 2.17- Pormenor do sistema de medição de deformações utilizado por De Sousa (2011)	23
Figura 2.18- Ensaio de fluência à tração realizado por De Sousa (2011).....	23
Figura 2.19- Ensaio de restrição à deformação realizado por De Sousa (2011).....	24
Figura 2.20- Ensaio de tração direta realizado por De Sousa (2011)	25
Figura 2.21- (a) Cofragem utilizada para o provete; (b) Pormenor da imperfeição na face do provete por De Sousa (2011);	26
Figura 2.22- Comportamento do sistema hidráulico em ensaio de fluência à tração: (a) Antes e (b) depois da substituição de mangueiras e bomba hidráulica em De Sousa (2013).....	27
Figura 2.23- Sistema de ensaio VRF após alteração da geometria do provete, em De Sousa (2013)	27
Figura 3.1- Atuador hidráulico utilizado em Altoubat e Lange (2001)	29
Figura 3.2- Desenho esquemático de um cilindro hidráulico	29
Figura 3.3- Esquema dos parâmetros referentes a uma mola	31
Figura 3.4- Representação de molas preparadas para diferentes fins	32
Figura 3.5- Sistema de ensaio com parafuso-porca e mola.....	33

Figura 3.6- Informações sobre tipo de molas e sua geometria retiradas de Budynas e Nisbett (2006)	36
.....	36
Figura 3.7- Exemplificação de uma <i>Die Spring</i>	38
Figura 3.8- Representação de uma mola belleville (<i>SPIROL</i>).....	39
Figura 3.9- Disposição das molas belleville em série.....	39
Figura 3.10- Sistemas de engrenagens associadas em série (a) Engrenagem simples e helicoidal; (b) Engrenagem cónica; (c) Engrenagem com sem fim; retiradas de Budynas e Nisbett (2006)....	40
Figura 3.11- Pormenor do encaixe dos dentes de uma engrenagem.....	41
Figura 3.12- Sistema de ensaio desenvolvido por Silva (2011).....	41
Figura 3.13- Sistema de ensaio com atuador formado por engrenagens	42
Figura 3.14- Representação das variáveis para o dimensionamento das engrenagens	43
Figura 3.15- Dimensões do sistema de engrenagens (m).....	46
Figura 3.16- Sistema de ensaio desenvolvido por Veiga (1997)	48
Figura 3.17- Sistema de ensaio com ligação parafuso-porca.....	48
Figura 3.18- Esquema detalhado de parâmetros de interesse (λ e α).....	51
Figura 4.1- Representação do provete utilizado no VRF.....	56
Figura 4.2- Molde utilizado para o provete VRF (m).....	57
Figura 4.3-(a) Pormenor da ligação da chapa de topo à chapa de base; (b) molde do provete VRF em fase de construção	58
Figura 4.4- Provelte resultante da utilização do novo molde.....	58
Figura 4.5- Representação do cilindro hidráulico utilizado no VRF	59
Figura 4.6- Aparato sistema de ensaio previamente concebido para a condução de ensaio piloto ...	60
Figura 4.7- Zonas de possíveis perdas de óleo.....	61
Figura 4.8- Representação do teste executado à válvula de retenção	62
Figura 4.9- Representação do teste executado à câmara de azoto	62
Figura 4.10- Representação do teste executado aos vedantes existentes na interface entre o cilindro e êmbolo.....	63
Figura 4.11- Representação do teste adicional aos vedantes existentes na interface entre o cilindro e êmbolo.....	64
Figura 4.12- Gráfico representativo do comportamento do cilindro hidráulico, após retificação, sujeito a carga constante	65
Figura 4.13- Representação do sistema de ensaio utilizando cola quente/betume poliéster.....	67
Figura 4.14- Deslocamentos sofridos pelo betume poliéster e cola quente, Ensaio 1	68
Figura 4.15- Deslocamentos sofridos pelo betume poliéster e cola quente, Ensaio 2	68
Figura 4.16- Deslocamento provocado pela retração da cola quente	69

Figura 4.17- Aparato do ensaio realizado com base em betão.....	70
Figura 4.18- Deslocamentos registados por cada um dos LVDTs mostrados na Figura 4.17	70
Figura 4.19- Representação cotada do sistema de fixação para LVDTs (m).....	72
Figura 4.20- Pormenor da guia concebida para ligação de extensor a LVDT	72
Figura 4.21- Pormenor da fixação dos LVDTs e sistema de fixação total	73
Figura 4.22- Legenda das faces do provete.....	73
Figura 4.23- Gráfico de deslocamentos	74
Figura 4.24- Gráfico da carga aplicada.....	74
Figura 4.25- Exemplo de plano genérico	76
Figura 4.26- (a) Plano resultante da descarga do 1ºCiclo da Tabela 4.6 μm ; (b) Plano resultante do carregamento do 2ºCiclo da Tabela 4.6 μm	76
Figura 4.27- Sistema de ensaio para ancoragem do varão ao pórtico pelo uso de porcas	78
Figura 4.28- Exemplificação dos dispositivos de ancoragem.....	81
Figura 4.29- Esquematização do sistema de ensaio ao varão	83
Figura 4.30- Gráfico resultante do ensaio de varão sobre carga constante, após carregamento.....	83
Figura 4.31- Gráficos resultantes de dois ensaios de aplicação de momento torsor e arquivo da carga correspondente	85
Figura 4.32- Sistema de ensaio com célula de carga e cilindro hidráulico	88
Figura 4.33- Sistema de aplicação de carga por aperto.....	88
Figura 4.34- Gráficos representativos dos ensaios com cunhas.....	89
Figura 4.35- Resultado do ensaio conduzido com cilindro hidráulico	90
Figura 4.36- Representação do varão antes e depois de colocado o extensómetro	90
Figura 4.37- Gráfico Carga-Extensão de ensaios de aperto e com cilindro hidráulico	91
Figura 4.38- Sistema de ensaio utilizado para provete de betão armado	92
Figura 4.39- Gráfico resultante do ensaio de carga em patamares sobre provete de betão armado ..	92
Figura 4.40- Gráfico comparativo do desempenho de um provete de betão armado e de um varão só	93
Figura 4.41- Gráfico representativo de ensaio em carga constante num provete de betão armado...	94
Figura 4.42- Sistema de ensaio de restrição ativa à deformação	95
Figura 4.43- Representação da amplitude de focagem do microscópio, desde uma imagem com câmara normal e focagem a 20x e 400x com o microscópio	96
Figura 4.44- Representação dos pontos de referência.....	96
Figura 4.45- Lamela micrométrica.....	97
Figura 4.46- Sistema de medição para microscópio	98
Figura 4.47- Pormenor da fixação dos SIMs	98

Figura 4.48- Representação dos deslocamentos captados pelo sistema de medição	99
Figura 4.49- Patamares de carregamento instalados no provete	99
Figura 4.50- Resultado da comparação dos deslocamentos teóricos com deslocamentos medidos com microscópio	100
Figura 4.51- Imagem de lamelas sobrepostas captada com microscópio	101
Figura 4.52- Sistema de medição com lamelas	102
Figura 4.53- Resultado de ensaio de comparação entre LVDTs e microscópio	102
Figura 4.54- Sistema de ensaio de restrição ativa	105
Figura 4.55- Temperatura e humidade relativa na cave do laboratório da Universidade do Minho	105
Figura 4.56- Resultado do ensaio de restrição ativa	106
Figura 4.57- Resultado da tensão instalada no betão, segundo Cusson e Hoogeveen (2006)	106
Figura 4.58- Resultado do ensaio de tração direta	108
Figura 7.1- Efeito da evolução da retração	115
Figura 7.2- Efeito da variação da temperatura	117
Figura 7.3- Efeito da solicitação imposta pelo atuador	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Sistemas de ensaio desenvolvidos no âmbito da retração restringida ativa.....	19
Tabela 3.1- Tabela de iterações para o dimensionamento da mola de compressão.....	37
Tabela 3.2- Valores de K para diferentes condições de ligação retirados de Budynas e Nisbett (2006).....	51
Tabela 3.3- Sistemas atuadores estudados	53
Tabela 4.1- Composição do betão A kg/m³	54
Tabela 4.2- Composição do betão B kg/m³	55
Tabela 4.3- Características das cantoneiras	57
Tabela 4.4- Dispositivos a estudar e suas respetivas funções	60
Tabela 4.5- Resultados obtidos nos ensaios estáticos	71
Tabela 4.6- Representação dos deslocamentos medidos para uma carga de 7kN	75
Tabela 4.7- Representação das cotas da face esquerda.....	77
Tabela 4.8- Comparação da carga referente à fendilhação estabilizada de um provete de betão armado e resistência à tração do respetivo varão maquinado	80
Tabela 4.9- Comparação da carga referente à fendilhação estabilizada de um provete de betão armado e resistência à tração do respetivo varão	82
Tabela 4.10- Perdas por relaxação calculadas pelo CEN (2004a)	84
Tabela 4.11- Representação dos esforços e coeficientes de atrito, de cada ensaio, para correspondente momento torsor.....	86
Tabela 4.12- Passos relativos à medição de determinada deformação	97
Tabela 4.13- Processo de melhoramento para o tratamento das imagens.....	103
Tabela 7.1- Extensões resultantes da evolução da retração	116
Tabela 7.2- Extensões resultantes da variação da temperatura.....	117
Tabela 7.3- Extensões resultantes da aplicação de carga.....	119

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Durante o tempo de serviço das estruturas de betão, estas sofrem variações volumétricas que resultam de diferentes componentes, fortemente influenciadas pelo ambiente circundante. Uma das componentes mais importantes destas variações volumétricas é a retração de secagem. De facto, as variações volumétricas dela decorrentes podem induzir tensões internas relevantes, sempre que haja impedimento parcial ou total às livres deformações. A restrição pode ser devida à interação com outros elementos (restrição externa), devida à interação com as armaduras, ou até devida à distribuição não uniforme da tendência de retração ao nível de uma mesma secção transversal (restrição interna). Caso não seja adequadamente controlada, a fissuração decorrente das deformações impedidas pode induzir problemas de ordem estética, bem como a redução drástica do período de vida útil da estrutura por aceleração de fenómenos como a carbonatação e a corrosão.

O dimensionamento das estruturas de betão, executado com o recurso a códigos regulamentares, não atesta de forma consistente o efeito da retração restringida. O seguimento dos regulamentos em questão, não permite ainda proporcionar os resultados requeridos no que toca ao desempenho das estruturas a longo prazo, pois tanto ocorre o sobredimensionamento das mesmas, aumentando os custos associados, como leva à utilização de densidades de armaduras insuficientes. Poucos investigadores, entre os quais Sule e Breugel (2001) e Cusson e Hoogeveen (2006), estudaram a suscetibilidade à fissuração no caso de betão armado, utilizando sistemas de restrição ativa à deformação.

De facto, a utilização de fibras discretas tem apresentado um enorme potencial no controlo da fissuração. As mesmas têm vindo a ser objeto de estudo em ensaios de curto prazo, como flexão, corte, ações cíclicas, apresentando resultados de tal forma favoráveis (ACI Committee 544, 2009), que permitem, em alguns casos, a substituição parcial/total das armaduras convencionais. A utilização de fibras proporciona uma fendilhação uniforme e estabilizada, ou seja, as fendas que, anteriormente, eram de grande dimensão quando utilizadas soluções com armaduras convencionais, são desta vez mais abundantes, mas com a particularidade de atingirem aberturas cuja ordem de grandeza é bastante inferior. Além disto, a sua conjugação no betão apresenta vantagens ao nível da economia, visto que não obriga o posicionamento

prévio das armaduras (no caso das armaduras convencionais) para a posterior betonagem. Pelo facto de estas permitirem a transferência de esforços entre fendas, diferentes investigadores do contexto da retração impedida têm vindo a estudar o seu desempenho no controlo da fissuração.

Contudo, a aplicação de fibras dispostas aleatoriamente conjugadas com armaduras convencionais no betão com o intuito de melhorar o desempenho das estruturas sujeitas às restrições impostas, representa uma temática ainda desconhecida. Existem apenas investigações referentes a ensaios de curto prazo, tais como ensaios de tração direta executados por Abrishami e Mitchell (1997) e Bischoff (2003).

Para a simulação de estruturas parcial/totalmente restringidas é habitual serem utilizados sistemas de restrição ativa à deformação. Os ensaios, de longo prazo, em questão passam por manter os provetes em deformação nula e quando estes atingem um determinado limite de deformação são recarregados, recuperando o seu comprimento inicial. Estes ensaios permitem aferir a evolução das tensões ao longo do tempo de secagem dos provetes, passando por uma intrincada interação entre a retração e fluência.

1.2 Objetivos

O objetivo principal inerente a esta dissertação é o fornecimento de um sistema de ensaio de restrição ativa à deformação, ao laboratório de estruturas da Universidade do Minho, com o nível de robustez necessária à correta condução de ensaios de longo prazo, capaz de testar provetes de betão armado.

Perante o objetivo central, serão realizadas diversas alterações que permitam a aprovação do sistema de ensaio desenvolvido por De Sousa (2011). Estas alterações envolverão: extinguir a ocorrência de lacunas relacionadas com a geometria do provete; permitir a diminuição da quantidade de reposições aplicadas ao cilindro hidráulico quando sujeito a carregamentos constantes; possibilitar a dispensa do uso de materiais na colagem do sistema de medição, cujos materiais conduzem a deformações relacionadas com os tempos de cura dos mesmos.

Adicionalmente, serão estudados diversos sistemas de ensaio de restrição à deformação, elaborados até ao momento, e sistemas atuadores alternativos, de controlo manual, com base na disciplina de órgãos de máquinas do curso de Engenharia Mecânica, de baixo custo,

possibilitando obedecer por igual aos requisitos necessários à habitual condução de ensaios de longo prazo. Este estudo surge como inspiração para a conceção de um novo sistema de ensaio de baixo custo, capaz de testar provetes prismáticos de betão armado, para uso simultâneo com o sistema *VRF*. Para tal, é proposto um atuador que aplique os esforços necessários para a simulação parcial/total de um provete restringido de se deformar e que permita dispensar o uso de célula de carga, permitindo a redução considerável dos custos associados em comparação com os atuadores hidráulicos e servo-hidráulicos, que são, maioritariamente, utilizados hoje em dia. Adicionalmente, é sugerido um sistema de medição de deslocamentos, que controle as deformações ao longo dos ensaios, igualmente de preço reduzido, podendo dispensar a utilização de LVDTs (e todos os equipamentos necessários à sua utilização, tais como os sistemas de aquisição), visto que são dispositivos bastante dispendiosos.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo constitui a introdução, enquadrando os interesses pelo qual é executada a dissertação.

O segundo capítulo reporta vários sistemas de ensaios de restrição ativa à deformação utilizados por diferentes investigadores, desenvolvidos para testar provetes de betão simples e de betão armado. Adicionalmente, é apresentado o sistema de ensaio *VRF*, desenvolvido por De Sousa (2011) na Universidade do Minho, analisando os problemas constatados na sua conceção, para a sua posterior validação.

O capítulo 3 propõe diferentes alternativas para sistemas atuadores de baixo custo, de controlo manual, que resulta da pesquisa de matérias referentes à disciplina de órgãos de máquinas do curso de Engenharia mecânica. As alternativas propostas englobarão o dimensionamento de atuadores hidráulicos, sistemas em que são implementadas molas de compressão para aumento da rigidez do sistema, dispositivos constituídos por engrenagens e, finalmente, um atuador composto pelo aperto de uma ligação parafuso-porca.

O capítulo 4 encontra-se dividido em duas partes. Primeiramente, são apresentadas as alterações executadas ao sistema de ensaio *VRF* desenvolvido por De Sousa (2011), no que toca à conceção de um novo molde, às medidas impostas para o aperfeiçoamento do desempenho do atuador hidráulico na condução de ensaios de longo prazo e o

desenvolvimento de um novo sistema de suporte de LVDTs. Seguidamente, serão reportados ensaios, de curto prazo, cujo resultado pretende mostrar os melhoramentos proporcionados. Numa segunda parte, é apresentado um novo sistema de ensaio para utilização simultânea ao *VRF*, que permita a condução de vários testes ao mesmo tempo e, como tal, terá de atingir custos controlados. Para tal, são executados diversos testes ao atuador por aperto, estudado no capítulo 3, no que toca ao seu desempenho quando sujeito a carregamentos constantes e a possibilidade de aplicar variações de esforços reduzidas. Adicionalmente, é concebido um sistema de medição de deformações, baseado na captação de imagens por um microscópio USB, cujas deformações são calculadas através da distância relativa entre dois pontos de diferentes imagens. No final do capítulo 4 é efetuado um ensaio de restrição ativa à deformação para avaliação do potencial do sistema de ensaio desenvolvido.

Por ultimo, no capítulo 5 faz-se uma conclusão geral dos trabalhos realizados, bem como uma apreciação dos mesmos. Adicionalmente, são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos.

2 ENSAIOS DE RESTRIÇÃO ATIVA À DEFORMAÇÃO

2.1 Introdução

Os ensaios de restrição ativa à deformação são normalmente utilizados para avaliação das tensões introduzidas no betão quando este é, total ou parcialmente, impedido de se deformar (deformações impostas térmicas ou de retração). O ensaio permite aferir acerca das tensões associadas às deformações impostas, permitindo portanto, obter importantes informações para comparação de desempenho de materiais e para simulação numérica do risco de fissuração. Paralelamente, os sistemas que permitem o ensaio de provetes armados, possibilitam de igual modo, o estudo das intrincadas interações entre a relaxação das tensões no provete e os fenómenos de fissuração.

Os sistemas de restrição ativa à deformação são, na generalidade, compostos por três partes: i) o atuador, responsável pela aplicação de esforços; ii) o provete, que desempenha um exemplo da realidade, sendo neste que se centra o estudo, e iii) um sistema de medição de deformações.

O presente capítulo, que se encontra dividido em três partes, descreve quais os sistemas de restrição ativa à deformação existentes, dando especial atenção aos atuadores utilizados. Na primeira parte, será dada importância/relevância aos dispositivos de ensaio preparados para o estudo de provetes em betão simples; na segunda, ter-se-á em conta os ensaios preparados para betão armado; e na terceira, será realizada uma análise ao sistema de ensaio desenvolvido na Universidade do Minho por De Sousa (2011), que foi sujeito a adaptações e melhoramentos no contexto desta dissertação.

Os ensaios de restrição ativa à deformação são utilizados para o estudo da retração do betão nas primeiras idades, sendo o provete em estudo sujeito a ciclos de recarga para a recuperação do seu comprimento inicial. O princípio base deste ensaio passa por manter a deformação do provete nula, ou quase nula, ao longo do tempo, através da aplicação de esforços, contrários aos originados pelo desenvolvimento da retração. Paralelamente, é necessária a medição da carga a que o provete fica sujeito, para que o princípio do ensaio seja cumprido, sendo assim, possível simular uma estrutura total ou parcialmente restringida de se deformar. Este efeito pode ser verificado através da Figura 2.1 que representa a variação das deformações durante um ensaio de restrição ativa. Observando esta figura, é possível constatar que o primeiro ciclo

corresponde ao intervalo entre t_0 e t_1 , no qual o provete é deixado retrair até que, em t_1 , é atingido o limite de deformação pré-definido, $\Delta\varepsilon$. Nesse instante, um atuador aplica uma tensão de tração, $\Delta\sigma_1$, e o provete readquire o seu comprimento inicial, pelo que esta tensão conduzirá a um alongamento de $\Delta\varepsilon_1$, sendo $\Delta\varepsilon_1 = -\Delta\varepsilon$. É de notar que entre t_0 e t_1 a tensão aplicada pelo atuador aumenta significativamente. Este aumento deve-se ao desenvolvimento da retração, a qual gera esforços contrários aos aplicados pelo atuador, consequentemente, a tensão total aplicada ao longo deste ciclo é dada por σ_1 . Após o término do primeiro intervalo, inicia-se um novo ciclo com a duração de t_1 a t_2 , sendo este processo repetido faseadamente, cuja evolução pode ser observada na Figura 2.2.

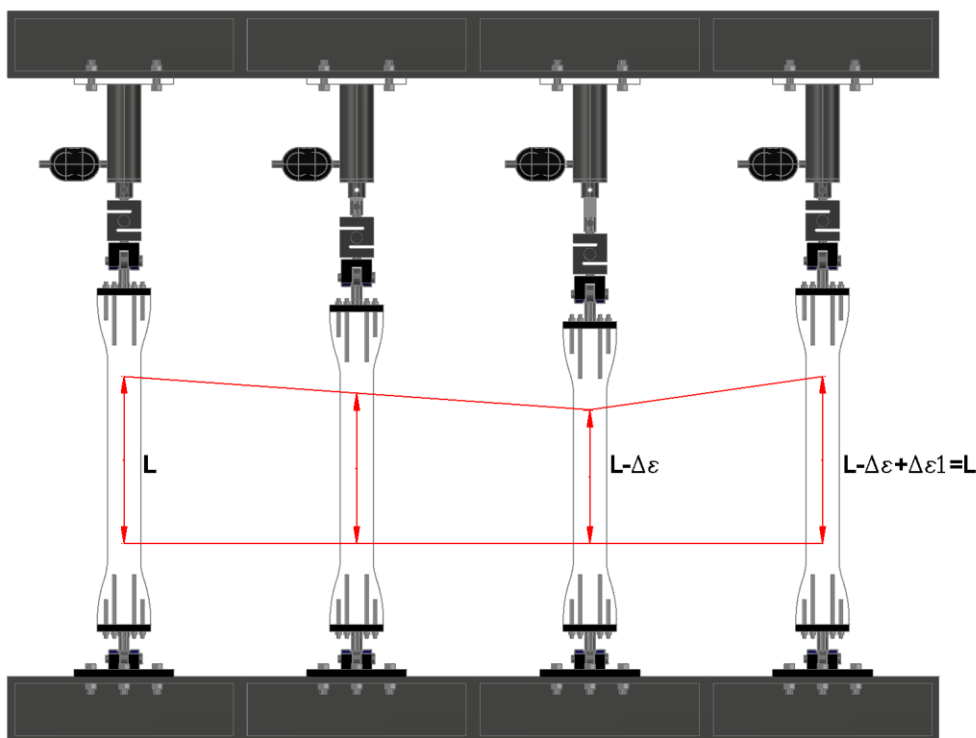


Figura 2.1- Exemplificação de um ciclo de ensaio de restrição ativa

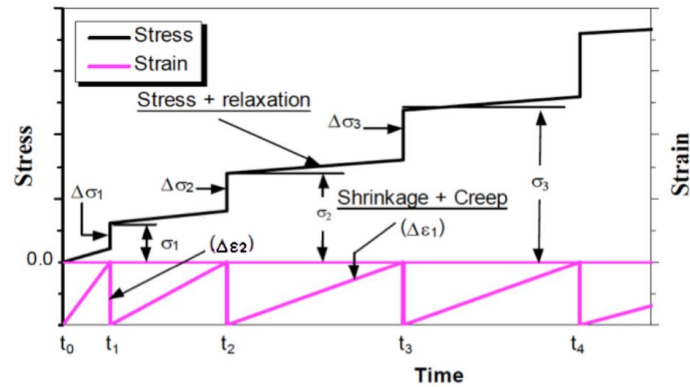


Figura 2.2- Representação esquemática das tensões e deformações num ensaio de restrição ativa

Neste tipo de ensaio, através da medição das cargas aplicadas e da deformação do provete, é possível retirar conclusões acerca do desempenho do betão ao nível da fluência, resultante dos carregamentos constantes, e do módulo de elasticidade, consequência dos recarregamentos aplicadas no provete. O estudo dos efeitos da retração impedida desencadeia uma problemática de grande importância na compreensão da evolução das características dos materiais. O desenvolvimento deste fenómeno tem maior intensidade nas primeiras idades, coincidindo com o período em que o betão tende a adquirir as suas propriedades mecânicas. Como tal, a má compreensão dos fenómenos que englobam a restrição à deformação pode conduzir não só ao mau comportamento das estruturas em serviço, como, também, à deficiência do betão, resultante das interferências a que este está sujeito, enquanto jovem, podendo influenciar as características finais do mesmo.

2.2 Sistemas de restrição ativa à deformação para betão simples

Um dos primeiros sistemas de ensaio, de controlo manual, retratado na Figura 2.3, surgiu em 1976 elaborado por Paillère e Serrano (1976). Este sistema de ensaio utiliza duas garras metálicas que ancoram um provete de geometria com a forma de um osso, de secção transversal $70 \times 50 \text{mm}^2$ na zona corrente e comprimento total de $1,75 \text{m}$. O provete é betonado na posição horizontal e, posteriormente, ensaiado na posição vertical, através da rotação da base da cofragem sobre um eixo transversal à mesma. A extremidade móvel do provete encontra-se ligada a um sistema de ar comprimido (atuador pneumático) que desempenha a função de atuador, reposicionando o provete no instante em que é atingido 1mm , sendo este o limite de deformação adotado previamente. As medições, quer ao nível

dos deslocamentos, quer dos esforços instalados, são efetuadas através de transdutores, que registam estes dados para posteriormente tratamento.

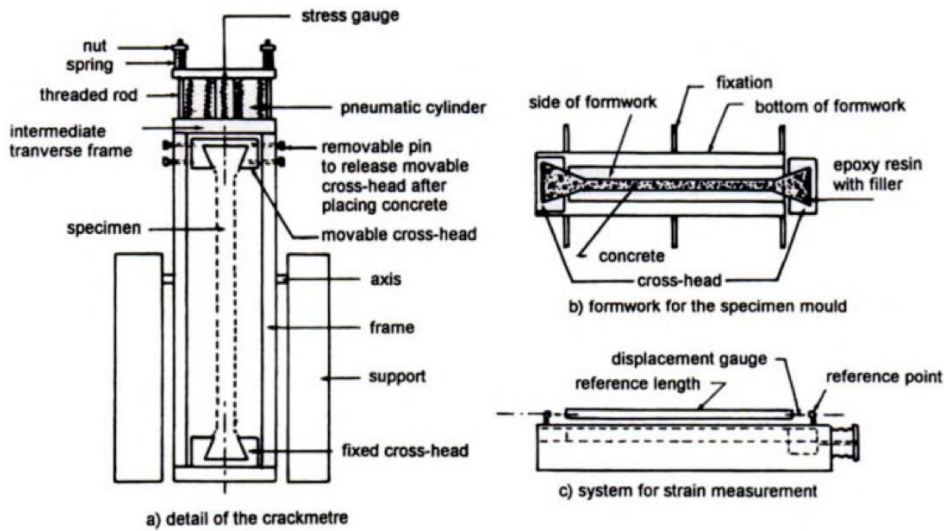


Figura 2.3- Sistema de ensaio desenvolvido por Paillère e Serrano (1976)

Seguidamente, Paillère et al. (1989) conceberam determinadas alterações no sistema de ensaio anterior, como é observável na Figura 2.4. As dimensões do provete são modificadas, desta vez com 1500mm de comprimento e secção transversal $85 \times 120\text{mm}^2$. O mesmo encontra-se ligado a dois cilindros pneumáticos, que exercem a carga necessária à sua reposição, enquanto um dinamómetro concêntrico com estes regista os esforços aplicados.

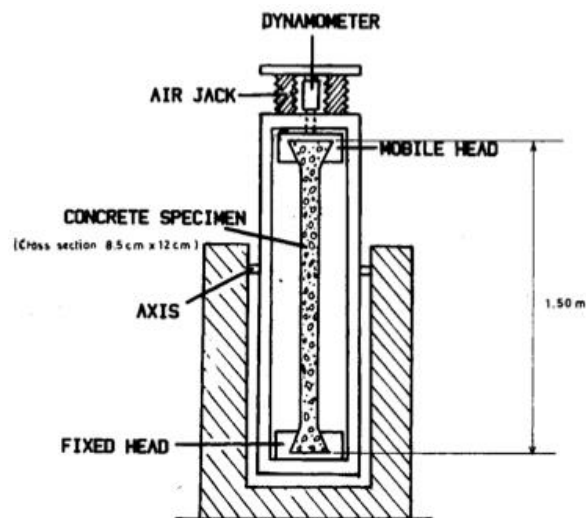


Figura 2.4- Sistema desenvolvido por Paillère et al. (1989)

Posteriormente, Bloom e Bentur (1993), inspirados no dispositivo efetuado por Paillère et al. (1989), desenvolveram um novo sistema de ensaio representado na Figura 2.5. Desta feita, o provete é ensaiado na posição horizontal, tendo este uma secção transversal de $40 \times 40\text{mm}^2$ e um comprimento de 1000mm . As extremidades alargadas, do provete, são ancoradas a duas garras, estando uma fixa e a outra livre de se deformar. A medição dos deslocamentos é executada na garra da extremidade móvel, registados através de uma sonda (ponto 9 da Figura 2.5). O aperto manual de um parafuso mecânico (Ponto 7 e 8 da Figura 2.5), que se encontra ligado à garra móvel (Ponto 5 da Figura 2.5) através de uma célula de carga (Ponto 6 da Figura 2.5), que regista a carga aplicada ao provete, permite o reposicionamento deste à sua disposição inicial. O provete é carregado sempre que é atingido o limite de deformação pré-definido de $2\mu\text{m}$, observados na sonda de deslocamento. A garra da extremidade livre do provete desliza através de dois eixos laterais (Ponto 3 da Figura 2.5), eliminando possíveis excentricidades resultantes dos carregamentos. O sistema consegue suportar esforços na ordem dos 5000N , ou seja, é capaz de atingir tensões de tração de $3,125\text{MPa}$ no provete, suficiente para atingir a fissuração do mesmo.

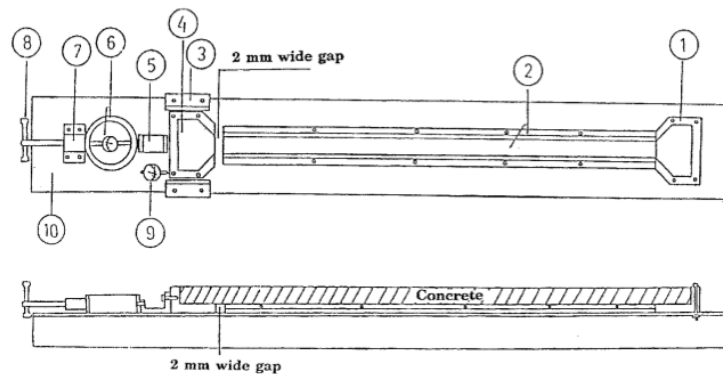


Figura 2.5- Sistema de ensaio desenvolvido por Bloom e Bentur (1993)

A seguir, Springenschmid et al. (1994) elaborou um sistema denominado por *Temperature – stress testing machine*, esquematizado na Figura 2.6. Este sistema de ensaio, realizado na horizontal, revoluciona os sistemas de ensaio desenvolvidos até à data, visto que é utilizada uma cofragem que permite registar as deformações devido à temperatura. Os provetes com a geometria de um osso de cão, têm uma secção transversal corrente de $150 \times 150\text{mm}^2$ e comprimento total de 1500mm . As suas extremidades são presas por garras metálicas e os deslocamentos são medidos em duas secções: a primeira medição é efetuada na garra móvel e a segunda através de LVDTs, com precisão de $0,1\mu\text{m}$, localizados em duas barras de carbono,

que se encontram paralelas à zona de secção transversal constante do provete. O atuador é constituído por um motor de passo, automaticamente controlado por um computador. Este é acionado quando a deformação do comprimento do provete atinge $1\mu m$, sendo este esforço registado por uma célula de carga. A rotação do fuso, que se desenvolve desde o interior do motor até à garra móvel, permite a aplicação de deslocamentos e, por conseguinte, esforços no provete. O ensaio inicia-se após a desmoldagem do provete, tendo a duração de oito dias. Posteriormente, Bjøntegaard et al. (1999) e Lin et al. (2008) desenvolveram/utilizaram o mesmo sistema *TSTM* executado por Springenschmid et al. (1994).



Figura 2.6- Sistema de ensaio desenvolvido por Springenschmid et al. (1994)

No mesmo ano, Kovler (1994) desenvolveu um sistema de ensaio, representado na Figura 2.7, inspirado no de Bloom e Bentur (1993), utilizando dois provetes de extremidades aumentadas, com $40 \times 40 mm^2$ de secção transversal na zona de secção constante e $1000 mm$ de comprimento total, ensaiados na posição horizontal. Um dos provetes é submetido à restrição parcial/total e outro retrai livremente. O provete restrito encontra-se ancorado por duas garras metálicas às extremidades ampliadas, sendo uma das extremidades fixa, enquanto a outra retrai livremente. Quando o provete ao retrair atinge o limite de deformação pré-definido,

cujo limite adotado é de $5\mu m$, é automaticamente reposicionado por um atuador. As deformações de ambos os provetes são medidas através de LVDTs, nas extremidades móveis dos mesmos. A carga aplicada é executada por um motor de passo, controlada por um computador, sendo os esforços medidos por uma célula de carga, situada entre o motor e a extremidade livre. Este método tem ainda a particularidade de não necessitar do controlo humano, pois trata-se de um sistema completamente automatizado. O ensaio inicia-se após a desmoldagem do provete, tendo uma duração de sete dias. Este sistema de ensaio veio a ser utilizado mais tarde por Tao e Weizu (2006) e por Hengjing et al. (2008).

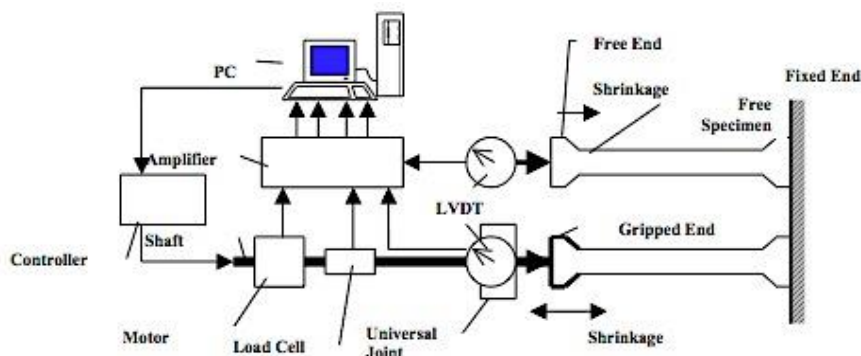


Figura 2.7- Sistema de ensaio desenvolvido por Kovler (1994)

Grande parte dos investigadores que vieram a estudar até aos dias de hoje o fenómeno da retração restringida, desenvolveram sistemas de ensaio inspirados nos trabalhos realizados por Springenschmid et al. (1994) e Kovler (1994).

Recentemente, Aly et al. (2008) elaborou um sistema de ensaio de retração restringida ativa, utilizando um provete de geometria em osso de cão, com secção transversal de $75 \times 75 mm^2$ na zona corrente e comprimento total de $1100 mm$, representados na Figura 2.8. A ancoragem do provete é feita através de apertos embebidos nas extremidades dos provetes. O atuador é composto por uma caixa redutora (que será objeto de análise no Capítulo 3) ligada com um fuso localizado no seu interior, permitindo a aplicação de esforços no provete através da rotação de um volante. O fuso é ligado em série com uma célula de carga e o provete. A caixa redutora encontra-se encastrada à viga transversal da direita representada na Figura 2.8, que desliza ao longo de duas vigas longitudinais. Nestas vigas, são implementadas duas molas de compressão, que aumentam a flexibilidade do sistema de ensaio, permitindo relacionar a

carga aplicada no sistema através da observação da deformação das mesmas. Um LVDT é instalado na face superior do provete captando a sua deformação num comprimento de 700mm. O provete é tracionado sempre que é atingido o limite de deformação pré-definido, que se encontra entre os 4 e 8 $\mu\text{mm}/\text{mm}$, readquirindo o seu comprimento inicial. O provete é betonado diretamente no molde e desmoldado após 24 horas. Nesse momento, inicia-se o ensaio de restrição ativa, que termina quatro dias depois, mesmo que não ocorra a rotura do mesmo. Mais tarde, Aly e Sanjayan (2010) substituíram o volante da caixa redutora por um motor, apresentado na Figura 2.9.

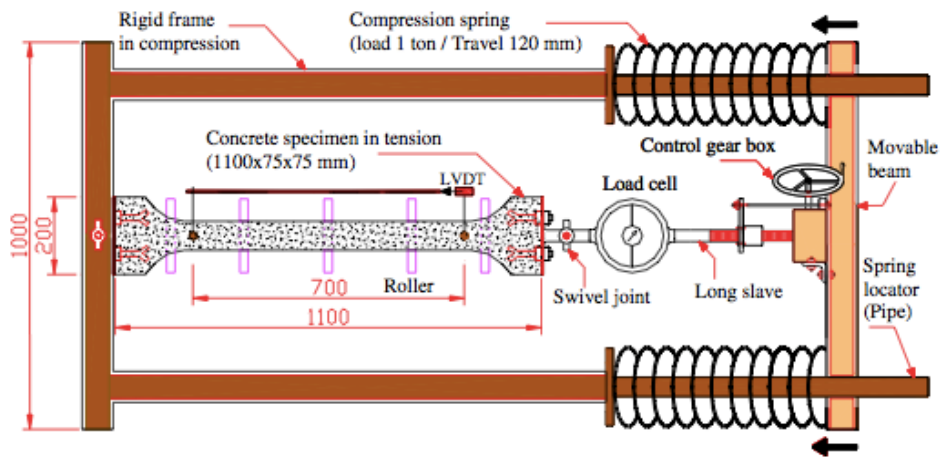


Figura 2.8- Desenho esquemático do sistema de ensaio desenvolvido por Aly et al. (2008)



Figura 2.9- Sistema de ensaio desenvolvido por Aly e Sanjayan (2010)

Existem diferentes abordagens relativamente ao comportamento de estruturas sujeitas à restrição ativa, contudo a mais utilizada para este efeito, foi desenvolvida por Kovler (1994).

O autor interpretou este ensaio comprovando que a deformação do provete ao longo do tempo, ε_{total} , é coincidente com o somatório da deformação por retração livre ao longo do tempo, ε_{sh} , medida no provete livre; da deformação elástica, ε_{el} , que figura a deformação causada no instante em que o provete é carregado; e da deformação por fluência, ε_{cr} , resultante dos carregamentos constantes que ocorrem ao longo de cada ciclo, tal como é possível observar na expressão seguinte:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{el} + \varepsilon_{cr} \approx 0 \quad \text{Eq. 2.1}$$

A expressão anterior pretende representar a sobreposição dos fenómenos que ocorrem durante um ensaio de restrição ativa. A soma de todas as componentes anteriores, ε_{total} , medida no provete restrito, varia entre a deformação nula e o limite de deformação pré-definido, razão pela qual é citado, anteriormente, que o princípio de um ensaio deste tipo passa por manter o provete em deformação nula ou quase nula. Adicionalmente, pode ainda ser considerada a deformação por temperatura, resultante das suas variações. Os ensaios em que esta componente não é incluída/medida, devem ser conduzidos em ambientes de temperatura constante, visto que este efeito pode conduzir a alterações volumétricas. A componente elástica, ε_{el} , pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\Delta\sigma(t)}{E(t)} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Sendo $\Delta\sigma(t)$ a variação da tensão aplicada ao provete e $E(t)$ o módulo de elasticidade, dependentes da idade do material ensaiado. Tal como explicado anteriormente, com base na Figura 2.2, em cada ciclo de carregamento, a carga tende a aumentar à medida que a retração evolui, sendo esta evolução contrariada pelo efeito da fluência. A fluência permite a redistribuição dos esforços, atrasando o alcance do limite de deformação pré-definido para o ensaio, podendo este efeito ser observado na Figura 2.10. Esta componente pode ser calculada através da Eq. 2.1, dado o conhecimento das outras variáveis ao longo do ensaio. No gráfico da Figura 2.10, elaborado por Kovler (1994), é possível observar a evolução das deformações, por retração, fluência e elástica.

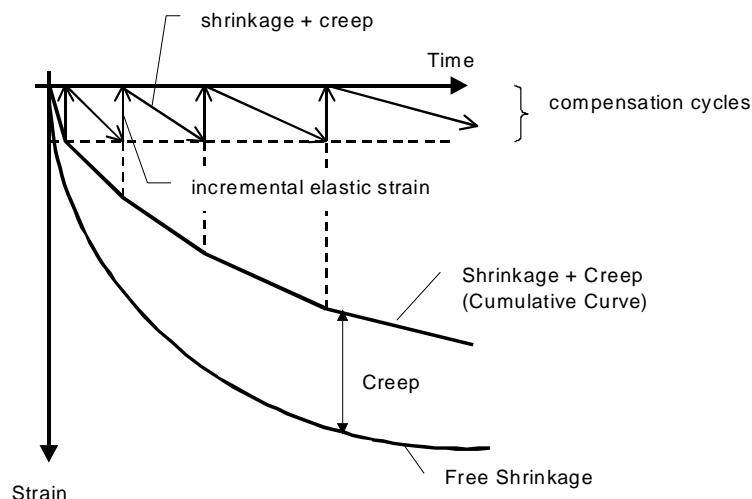


Figura 2.10- Esquema representativo das deformações que ocorrem durante ensaio de restrição ativa desenvolvido por Kovler (1994)

2.3 Sistemas de restrição ativa à deformação para betão armado

Os sistemas de restrição ativa à deformação preparados para betão armado são, normalmente, utilizados para o estudo do comportamento do betão em termos de fissuração, visto que, a armadura do provete permite garantir o avanço do ensaio, mesmo após ser atingida a fissuração do provete.

Sule e Breugel (2001) desenvolveram um sistema *TSTM*, capaz de ensaiar betão armado, exemplificado na Figura 2.11. O provete, com $150 \times 100\text{mm}^2$ de secção transversal na zona corrente e 1000mm de comprimento total, é segurado por duas garras nas extremidades: uma delas permanece fixa e outra encontra-se num tapete deslizante, conseguindo deformar-se e ser movimentada por um atuador hidráulico. A carga instalada pelo atuador é medida através da implementação de uma célula de carga. Para contabilizar as deformações ocorridas na armadura, são colocados sensores de deslocamento em dois entalhes executados na mesma, ao contrário da deformação no betão que é registada por dois LVDTs que se encontram em faces opostas. Os LVDTs são ligados a barras de vidro, com 750mm de comprimento, desenvolvendo-se ao longo da direção longitudinal do provete e intercetando-se com duas barras de aço embebidas no betão que se propagam na direção perpendicular, ou seja, na direção transversal ao provete. Neste sistema, o autor iniciou os ensaios após a desmoldagem dos provetes, tendo uma duração de seis dias.

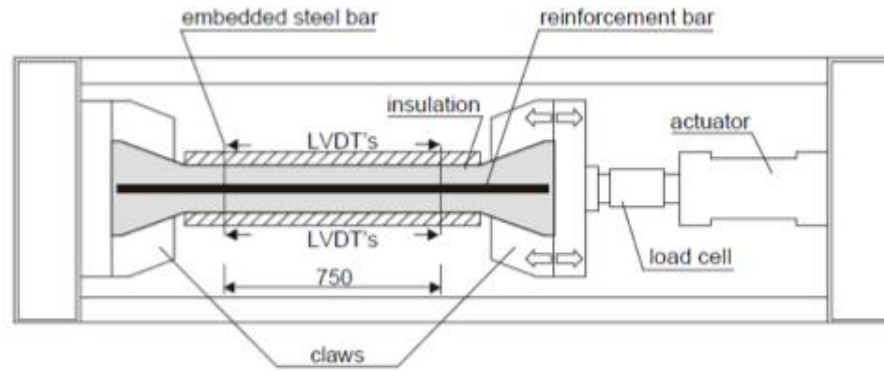


Figura 2.11- Sistema de ensaio desenvolvido por Sule e Breugel (2001)

Além do sistema anterior, Cusson e Hoogeveen (2006) desenvolveram um sistema preparado para o ensaio de provetes de betão armado, apresentado na Figura 2.12. Neste caso, a aplicação de esforços axiais, executada por um atuador hidráulico, é feita através da ancoragem das extremidades da armadura do provete. Os autores utilizaram uma geometria prismática para o provete, com $200 \times 200 \text{ mm}^2$ de secção transversal e 1000 mm de comprimento, contrariamente à maioria dos sistemas apresentados, visto que este não necessita de alargamento nas extremidades pois os esforços são aplicados na armadura. Os quatro varões $\phi 10$ instalados são dispostos a 50 mm das faces. As medições são executadas através da instalação de sondas de deslocamento e termo acopladores nos varões. As medições realizadas pelos transdutores de deslocamento devolvem o sinal a um circuito fechado que controla o sistema do atuador hidráulico. Cusson e Hoogeveen (2006) levaram a cabo ensaios com a duração de sete dias, iniciados após a desmoldagem do provete.

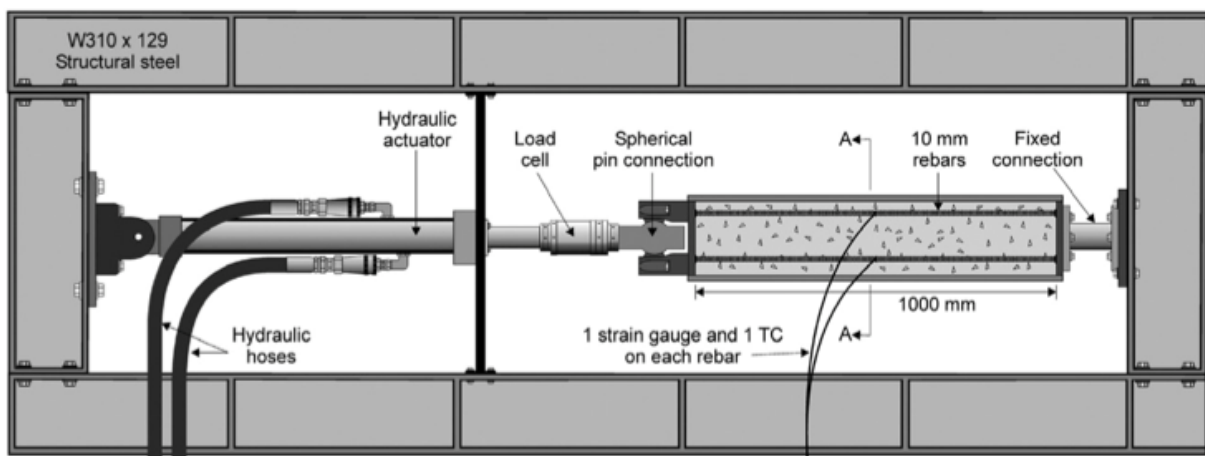


Figura 2.12- Sistema de ensaio desenvolvido por Cusson e Hoogeveen (2006)

Teixeira et al. (2012), da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, em colaboração com a Universidade do Minho, conceberam um sistema de ensaio de restrição ativa, ilustrado na Figura 2.13, denominado por VRF, *Variable Restraint Frame*. Este sistema inspirou-se no sistema desenvolvido de Cusson e Hoogeveen (2006), preparado para a condução de ensaios sobre provetes de betão armado. O mesmo engloba a instrumentação simultânea de dois provetes, um de betão simples que retrai livremente e outro de betão armado que se encontra restringido. Os provetes, restringido e livre, têm secção transversal $200 \times 100\text{mm}^2$ e comprimento de 1500mm . O comprimento do provete restrito foi calculado com o fim de assegurar a formação de um campo de extensões uniforme, ao longo de pelo menos 1000mm , cumprindo os requisitos de aderência entre a armadura e o betão. O provete armado tem embebido em si dois varões de aço da classe 8.8 centrados, garantindo um recobrimento de 35mm . A carga é aplicada nos varões, através de cilindros hidráulicos, alimentados por uma bomba manual. A medição das deformações, pelo efeito da retração e pela temperatura, é assegurada pela utilização de cordas vibrantes, extensómetros elétricos e um sensor de temperatura. Na zona não embebida de betão, são instrumentados dois extensómetros elétricos nos varões, sendo possível quantificar a carga transferida pelos atuadores ao provete. Adicionalmente, são colocadas duas células de carga de forma a contabilizar a carga introduzida no sistema, possibilitando a comparação com os resultados originados pelos dispositivos anteriores. Após a betonagem o provete é selado e deixado em repouso durante 64 horas. O início do ensaio coincide com as 64 horas, tendo durado até às 168 horas.

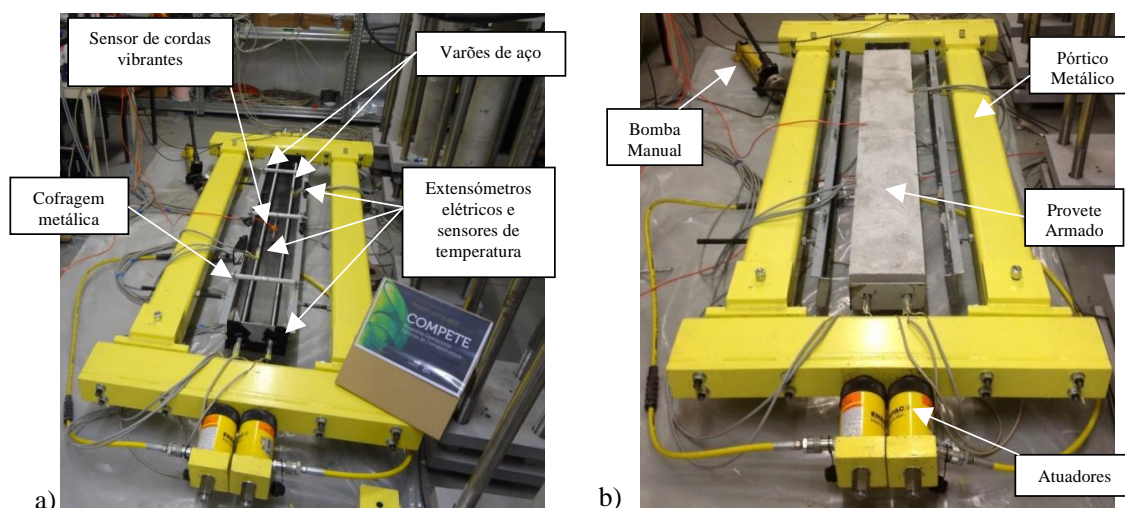


Figura 2.13- Sistema de ensaio desenvolvido por Teixeira et al. (2012) a) Antes da betonagem; b) Depois da betonagem

No contexto desta dissertação, pretende-se o estudo de estruturas de betão armado sujeitas às deformações impostas. Este estudo, embora diferindo apenas no tratamento dos resultados, segue o mesmo protocolo experimental de um ensaio aplicado a betão simples. A grande diferença na análise dos resultados é a contabilização da compatibilidade entre o betão e a armadura.

Convencionalmente, para estudar o comportamento mecânico do betão sujeito à retração restringida, dois provetes criados do mesmo betão são testados em simultâneo, sendo sujeitos às mesmas condições de cura: um completamente restrito, outro totalmente livre. A análise das extensões, segundo Cusson e Hoogeveen (2006), é baseada na seguinte compatibilidade de extensões:

$$\varepsilon_{tot}(t) = \varepsilon_{el}(t) + \varepsilon_{cr}(t) + \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{th}(t) \quad \text{Eq. 2.3}$$

onde os termos retratam, respetivamente, as extensões total, elástica, fluência, retração livre e de temperatura, medidas ao longo do tempo. Em aproximações convencionais, a componente elástica consiste na correção da extensão total quando se dá o incremento de uma força de tração, no instante em que a mesma atinge o limite de deformação pré-estabelecido, usualmente tido como $\leq 10\mu\varepsilon$. Nestas aproximações, a extensão elástica experienciada pelo betão é calculada através da medição dos esforços, para posterior contabilização da tensão no betão, e do módulo de elasticidade do betão na mesma data, tal como anteriormente citado na Eq. 2.2. Para calcular a tensão aplicada no provete, pode ser feito o seguinte raciocínio: quando o provete de betão armado restrito atinge o limite de deformação pré-definido, é sujeito a uma força de tração $P(t)$ e as deformações medidas na armadura e no betão são diferentes: O aço é sujeito à reação interna que é provocada pela compatibilidade do betão mais aço na sua interface, à aplicação da carga P que o faz retomar a sua posição inicial e ainda à deformação causada pela temperatura; O betão fica sujeito à reação interna, que é provocada pela compatibilidade do betão mais o aço na sua interface, aos deslocamentos provocados pela retração livre e à deformação causada pela temperatura. Com base nos pressupostos anteriores, é possível calcular a extensão no aço e a extensão no betão:

$$\varepsilon_s = \frac{R(t) + P(t)}{E_s A_s} + \alpha_s \Delta T(t) \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$\varepsilon_c = \frac{-R(t)}{E_c(t) A_c} + \alpha_c(t) \Delta T(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad \text{Eq. 2.5}$$

em que R é a reação interna do provete, a qual pode ser entendida como o esforço devido à compatibilidade entre o aço e o betão; E_s e A_s representam o módulo de elasticidade e a área da secção transversal do aço, respetivamente; E_c e A_c correspondem, respetivamente, ao módulo de elasticidade e à área da secção transversal do betão; e α_s e α_c , aos coeficientes de dilatação térmica do aço e do betão, respetivamente. Assumindo a compatibilidade de deslocamentos entre a armadura e o betão, ou seja, admitindo que a extensão do aço é coincidente com a extensão do betão, a tensão no betão pode ser calculada com o recurso à seguinte expressão:

$$\sigma_c(t) = \frac{\alpha_s \Delta T(t) E_s A_s + P(t) - \varepsilon_{tot}(t) E_s A_s}{A_c} \quad \text{Eq. 2.6}$$

A expressão anterior encontra-se, detalhadamente, analisada na secção 7.1, que se encontra no final do documento, para uma melhor compreensão do leitor.

A extensão térmica é alcançada através da leitura direta de um sensor de temperatura utilizado durante o ensaio. Finalmente, a extensão por fluência é determinada pela Eq. 2.3, visto que todas as variáveis restantes são conhecidas.

Uma vez que no contexto desta dissertação se pretende o estudo aprofundado dos sistemas atuadores utilizados na aplicação de esforços em ensaios de restrição ativa, foi construído um resumo desta mesma informação referente aos sistemas de ensaio desenvolvidos por diversos investigadores, podendo ser consultada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1- Sistemas de ensaio desenvolvidos no âmbito da retração restringida ativa

Autores	Tipo de atuador
Paillère e Serrano (1976)	Pneumático
Bloom e Bentur (1993)	Fuso de rotação manual
Kovler (1994)	Motor de passo
Springenschmid et al. (1994)	Motor de passo
Veiga (1997)	Fuso de rotação manual
Bjøntegaard et al. (1999)	Motor de passo
Pigeon et al. (2000)	Motor de passo
Altoubat e Lange (2001)	Hidráulico
Lura et al. (2001)	Hidráulico
Sule e Breugel (2001)	Hidráulico
Sun-Gyu et al. (2003)	Motor de passo
Atrushi (2003)	Motor de passo
Charron et al. (2004)	Motor de passo
Tao e Weizu (2006)	Motor de passo
Cusson e Hoogeveen (2006)	Hidráulico
Neto et al. (2007)	Motor de passo
Hammer (2007)	Motor de passo
Lin et al. (2008)	Motor de passo
Hengjing et al. (2008)	Motor de passo
Aly et al. (2008)	Caixa redutora/ Motor de passo
Kamen et al. (2008)	Hidráulico
Darquennes et al. (2010)	Motor de passo
Silva (2011)	Motor de passo
De Sousa (2011)	Hidráulico
Teixeira et al. (2012)	Hidráulico

2.4 Análise ao sistema desenvolvido na U.M.

De Sousa (2011), desenvolveu, na Universidade do Minho, um sistema de ensaio de retração restringida ativa para betão simples e armado, denominado por *VRF*, *Variable Restrained Frame*. Este sistema de ensaio tem a particularidade de se tratar de um ensaio de custo reduzido e aproveitar dispositivos inutilizados do laboratório da Universidade referida. O mesmo ensaio necessita de decorrer em ambiente de temperatura e humidade constantes, a fim de estas componentes não induzirem a alterações volumétricas, sendo o sistema não dotado de instrumentação que permita a contabilização destes efeitos. O sistema de ensaio engloba um provete, posicionado na vertical, um atuador hidráulico, célula de carga e sistema de medição de deformações, o que é possível ser observado na Figura 2.14.

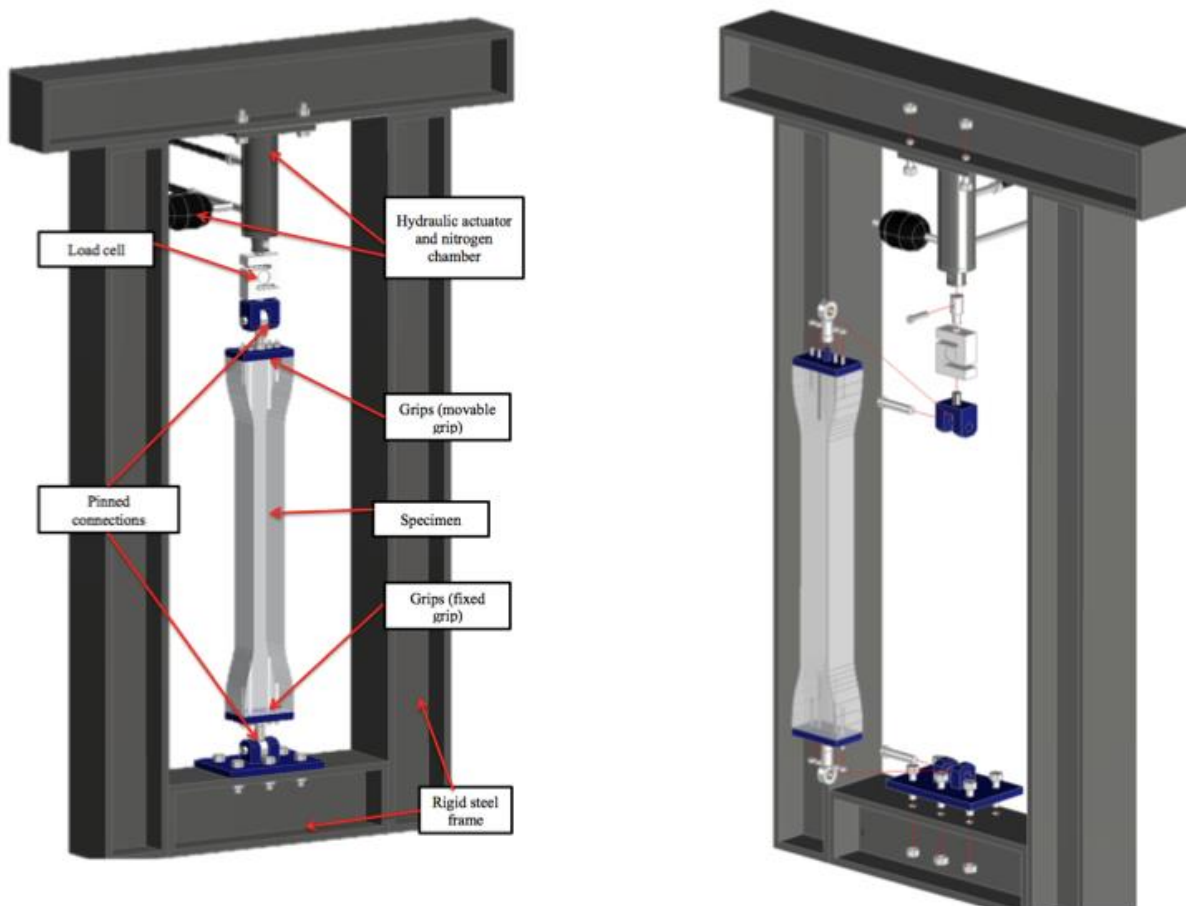


Figura 2.14- Sistema de ensaio VRF desenvolvido por De Sousa (2011)

O provete possui, em cada extremidade, quatro parafusos $\phi 10$ embebidos no seu interior, sendo a transferência de carga, executada através da aderência proporcionada na interface

entre o betão e os parafusos, que se encontram ligados a duas chapas de topo, como esquematizado na Figura 2.15. Cada chapa de topo é ligada a uma articulação, uma fixa ao pórtico rígido (extremidade inferior) e outra à célula de carga (extremidade superior). O atuador hidráulico é responsável pela reposição do provete à posição inicial, quando é atingido o limite de deformação predefinido, $10\mu m$ sobre um comprimento de $500mm$, e a célula de carga regista a carga aplicada. O provete, tipo osso de cão, tem de secção transversal $100 \times 100mm^2$ na zona corrente, alargando para $160 \times 100mm^2$ nas zonas de ancoragem, sendo o comprimento total de $1000mm$. A geometria do provete é caracterizada pelas extremidades suavemente alargadas para melhor transferência de esforços na passagem da zona alargada para a zona corrente, evitando o surgimento de tensões localizadas que possam conduzir à rotura antecipada do provete neste local, tal como pode ser observado na Figura 2.15.

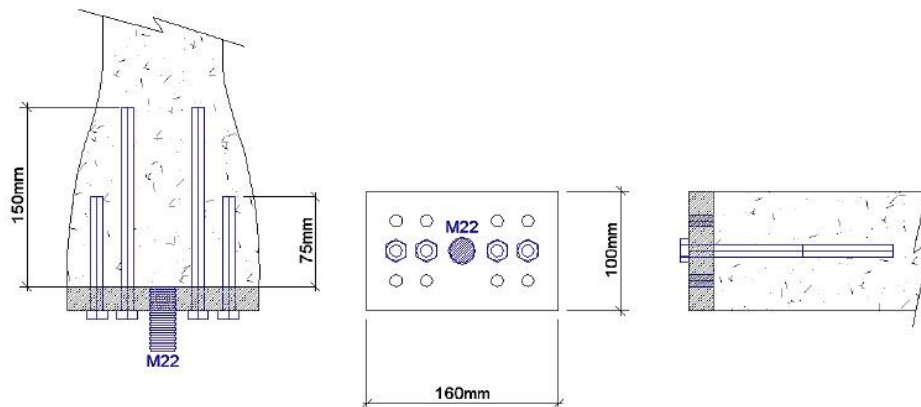


Figura 2.15- Pormenor dos parafusos embebidos no provete, chapa de base e geometria alargada da extremidade, por De Sousa (2011)

Adicionalmente, o sistema de ensaio foi desenhado para permitir a condução de ensaios em betão armado, como é possível observar na Figura 2.16. Contudo, o sistema não permite o uso de varões com diâmetro superior a $10mm$. A utilização de diâmetros iguais ou superiores a estes reduzem a secção de betão, não cumprindo os requisitos da área necessária à perfeita aderência entre o betão e o aço.

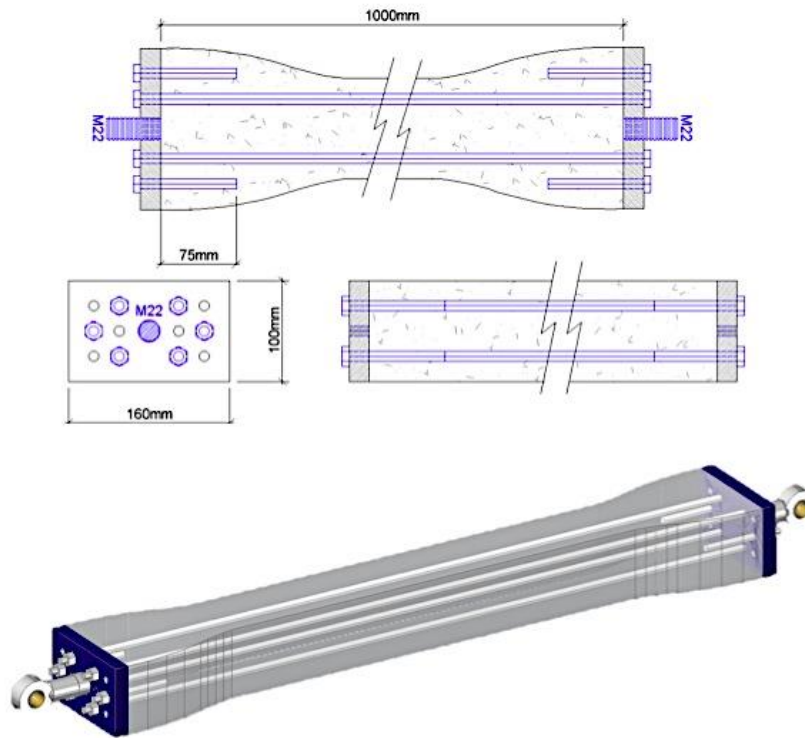


Figura 2.16- Desenho esquemático do provete de betão armado utilizado por De Sousa (2011)

A medição das deformações que ocorrem durante os ensaios é registada através de três LVDTs e um sistema de deslizamento. Com o ultimo é capturada a distância relativa entre dois pontos, que deslizam entre si, através de um microscópio USB, exemplificado na Figura 2.17. As braçadeiras, utilizadas para a fixação dos LVDTs, e o sistema de deslizamento são colados no provete, utilizando cola quente ou betume poliéster. A medição da variação de deslocamento, com LVDTs, é feita com um extensor, que se encontra ligado num ponto que dista 250mm do ponto situado no comprimento médio do provete, e em contacto com um LVDT situado, igualmente, a 250mm do ponto de comprimento médio, desta vez na direção contrária à do primeiro, ou seja, o LVDT capta os deslocamentos sofridos num comprimento total de 500mm .

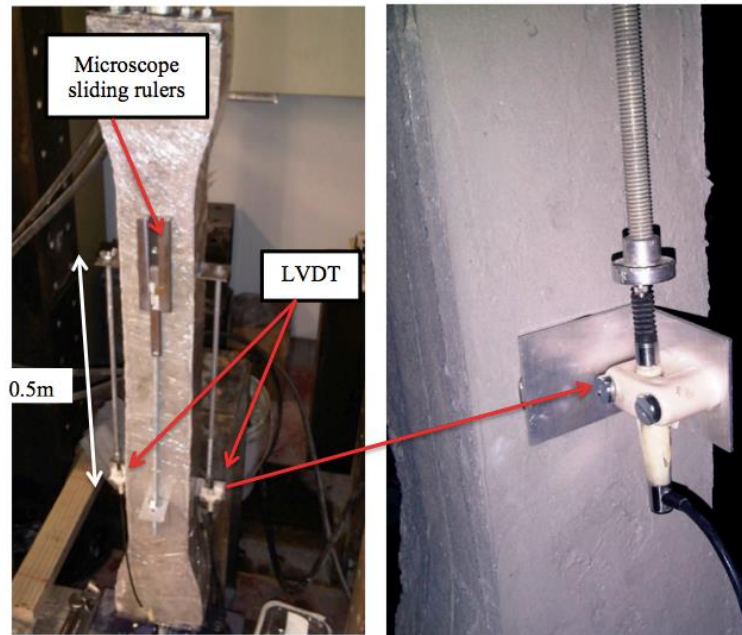


Figura 2.17- Pormenor do sistema de medição de deformações utilizado por De Sousa (2011)

De Sousa (2011) utilizou o *VRF* para a condução de diferentes ensaios, nomeadamente de fluência à tração, retração impedida, no caso de betão simples, e de tração direta, num provete de betão armado, apresentados na Figura 2.18, Figura 2.19 e Figura 2.20, respetivamente.

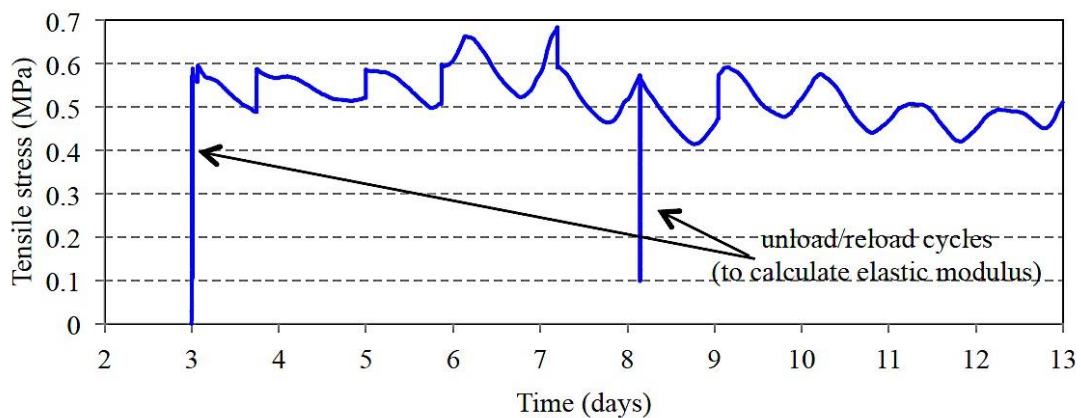


Figura 2.18- Ensaio de fluência à tração realizado por De Sousa (2011)

O ensaio de fluência à tração, representado na Figura 2.18, teve início no terceiro dia de idade do betão e consistiu na aplicação de uma tensão de $0,6\text{MPa}$. Ao contrário do que seria

esperado, o efeito da retração deveria induzir o acréscimo de carga no provete. Contudo, observa-se tanto a diminuição da carga, pressupondo o efeito da fluência, (ex:[3;4]dias), como o aumento da mesma, supondo o efeito da retração, (ex:[6;6,5]dias), dificultando a análise dos resultados deste ensaio. Estas variações de carga podem estar relacionadas com as deformações experimentadas pelo provete, visto que os ensaios decorreram num local onde não existia um ambiente de temperatura controlada, ou seja, o aumento ou a diminuição do volume do provete podiam interferir na carga aplicada pelo atuador. Além disso, considera-se, também, que estas variações de difícil compreensão podem ter sido originadas pelo comportamento do atuador hidráulico. Este não cumpria os requisitos de carga constante, obrigando ao recarregamento do provete com intervalos de tempo, relativamente, reduzidos.

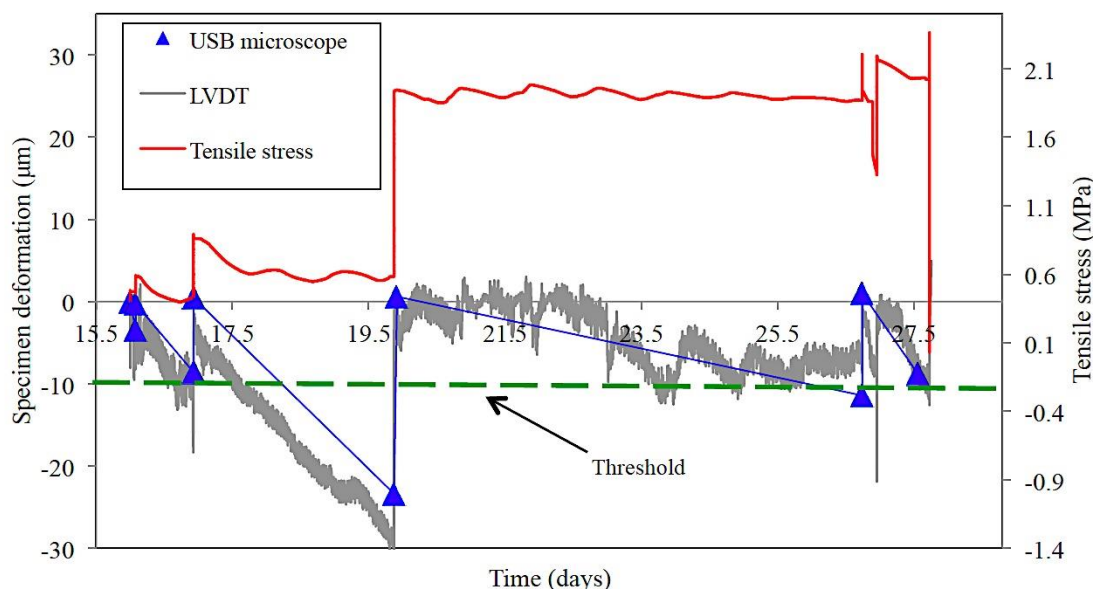


Figura 2.19- Ensaio de restrição à deformação realizado por De Sousa (2011)

Conforme é possível observar na Figura 2.19, que representa os resultados obtidos no ensaio de restrição à deformação no mesmo provete utilizado na experiência anterior, verifica-se que a evolução do ensaio corresponde ao que seria expectável. No entanto, o limite de deformação pré-definido é largamente ultrapassado entre os 17,5 e os 19,5 dias. Este acontecimento deve-se ao facto de esta data coincidir com um fim-de-semana, no qual não é permitido aceder ao laboratório. Por outro lado, verifica-se que a tensão aplicada, nos instantes em que se reposiciona o provete, não coincide verdadeiramente com o que foi reportado anteriormente, tal como se encontra na Figura 2.2. Considera-se que a intensidade da retração do provete nesta idade, numa fase em que o provete permaneceu, praticamente, 16 dias sujeito a

condições de secagem, já não seria de tal ordem elevada que provocasse o acréscimo da tensão durante os ciclos de carregamento. Quanto às deformações resultantes do sistema de medição, que foi previamente apresentado, considera-se que pode ter existido alguma interferência por parte dos materiais utilizados na colagem dos LVDTs, dada a variação de deslocamento inconstante ao longo de cada ciclo, fenómeno este que se observa perfeitamente durante o terceiro ciclo.

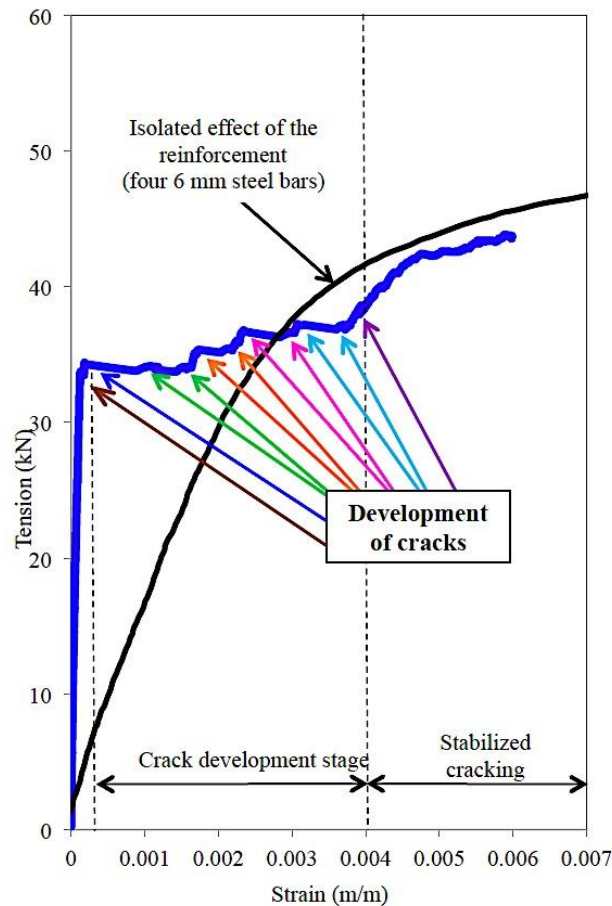


Figura 2.20- Ensaio de tração direta realizado por De Sousa (2011)

Na Figura 2.20 encontra-se representado o ensaio de tração direta realizado no provete de betão armado. O provete possuía quatro varões roscados no seu interior, com um diâmetro de 6mm . O comportamento do provete correspondia parcialmente às previsões realizadas, quer ao nível de carga e conseqüente deformação, quer ao nível de carga em relação à abertura de fendas. Verificou-se que o desempenho do provete após ser alcançada a fendilhação estabilizada é inferior quando comparado com a curva adicional, que traduz o comportamento da armadura isolada. Considerou-se que as deformações que foram contabilizadas não

correspondiam à realidade, como tal, admite-se que estes erros possam estar relacionados, uma vez mais, com os materiais utilizados na colagem do sistema medição.

Adicionalmente, o molde foi construído em madeira, através da colagem de várias placas sobrepostas e, posteriormente, foi esculpido manualmente com a forma do provete, exemplificado na Figura 2.21(a). Contudo, este processo resultou em diversas irregularidades nas secções periféricas do provete, não sendo possível garantir o paralelismo e perfeição necessários, tal como se observa na Figura 2.21(b).

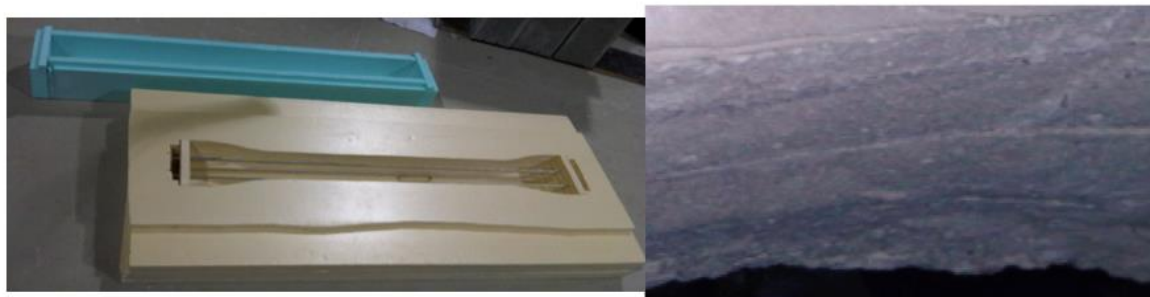


Figura 2.21- (a) Cofragem utilizada para o provete; (b) Pormenor da imperfeição na face do provete por De Sousa (2011);

Concluindo, para a validação deste sistema de ensaio, que fará parte do objetivo desta dissertação, seria necessário o melhoramento do desempenho do atuador, do sistema de medição, grande parte influenciada pelos materiais utilizados na colagem dos dispositivos que englobam o mesmo, e ainda do molde do provete.

Mais tarde, em De Sousa (2013), foram realizadas algumas modificações ao nível do atuador, tendo em conta suspeições de fugas de óleo do sistema. Para tal, foram renovadas as mangueiras de todo o circuito, bem como a bomba hidráulica utilizada. A Figura 2.22 representa o resultado das modificações realizadas ao sistema existente. É possível constatar uma melhoria substancial no comportamento do sistema hidráulico, conduzindo a recarregamentos menos frequentes.

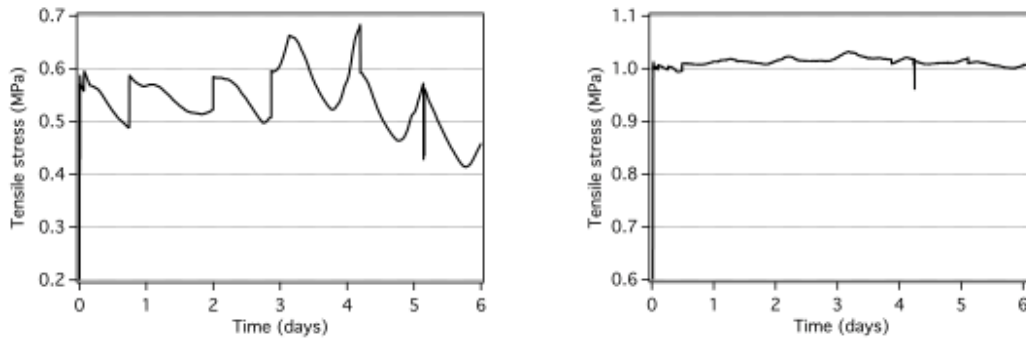


Figura 2.22- Comportamento do sistema hidráulico em ensaio de fluência à tração: (a) Antes e (b) depois da substituição de mangueiras e bomba hidráulica em De Sousa (2013)

Seguidamente, com o intuito de fazer face às limitações do sistema desenvolvido para a condução de ensaios em provetes de betão armado, foi proposta a alteração da geometria do provete de extremidades alargadas, representada na Figura 2.16, por um provete retangular, como exemplificado na Figura 2.23, permitindo a utilização de apenas um varão, sendo este concêntrico com a secção transversal. Nesta fase, o provete não necessita de extremidades alargadas, visto que essa solução é, habitualmente, utilizada quando se pretende uma suave transferência de esforços entre o atuador e a extremidade de provete de betão, dado que esta opção é utilizada para ensaios sobre betão simples. Como tal, a transferência de carga é nesse momento substituída pela aplicação direta de esforços na armadura, que, por cumprir os requisitos de aderência, permite solidarizar os esforços do betão e armadura, igualmente ao desenvolvido por Cusson e Hoogeveen (2006) e Teixeira et al. (2012), anteriormente citados.

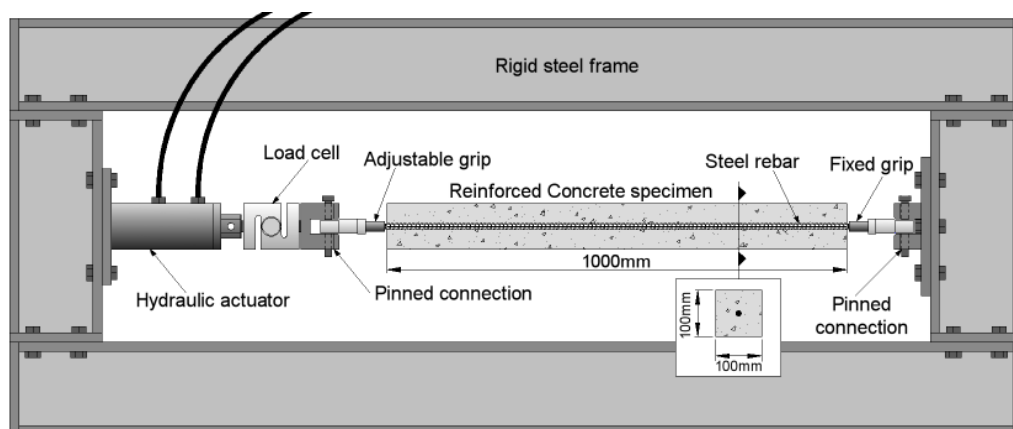


Figura 2.23- Sistema de ensaio VRF após alteração da geometria do provete, em De Sousa (2013)

3 SISTEMAS ATUADORES APLICADOS AOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO RESTRINGIDA

Dado que um dos objetivos principais da presente dissertação é o estabelecimento de um sistema de ensaio para impedimento parcial/total à restrição que permita a realização, de ensaios de longo prazo a custos controlados, torna-se importante a adequada compreensão das várias soluções possíveis para o atuador, que é usualmente uma das peças mais caras e complexas do sistema. Os atuadores mais utilizados, de maior precisão e capacidade máxima, são os hidráulicos e servo-hidráulicos; existem ainda, sistemas pneumáticos e elétricos. Contudo, este capítulo focar-se-á em atuadores alternativos aos anteriores (ex: molas, porcas/parafusos, rodas dentadas), para que seja possível adquirir um sistema de aplicação de carga de custo inferior e que tenha baixas perdas de força exercida ao longo do tempo, minimizando a necessidade de intervenção sobre o sistema ao longo do ensaio (uma vez que as aplicações de carga não serão automáticas). De seguida, pretende-se um atuador de baixa rigidez, que proporcione o conhecimento e a dedução da carga aplicada através da observação do sistema e que permita aplicar esforços que reproduzam deformações em provetes na ordem dos $10\mu\epsilon$, ou seja, capaz de aplicar deformações refinadas.

No presente capítulo é feita, conseqüentemente, uma descrição de várias alternativas possíveis para os atuadores, focando a atenção na capacidade de carga, precisão nessa mesma aplicação e correspondentes custos.

3.1 Atuadores hidráulicos

Os atuadores hidráulicos oferecem um alto desempenho em termos de capacidade de carga, existindo vários investigadores que utilizam este tipo de atuador para a condução dos mais diversos ensaios, tais como Altoubat e Lange (2001), Lura et al. (2001) e Sule e Breugel (2001). Na Figura 3.1 indica-se um exemplo de um sistema de ensaio para restrição parcial/total à deformação, elaborado por Altoubat e Lange (2001), no qual é utilizado um atuador hidráulico.

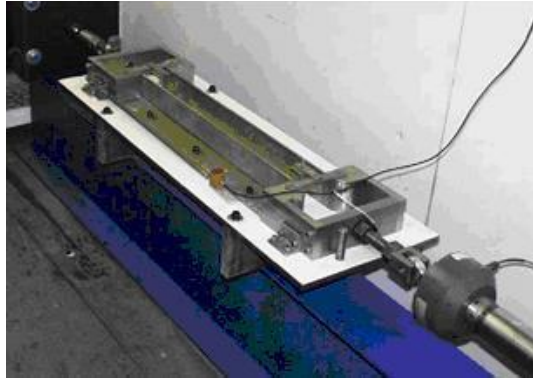


Figura 3.1- Atuador hidráulico utilizado em Altoubat e Lange (2001)

Um atuador hidráulico compreende um êmbolo, ligado a uma haste, que se desloca no interior de um cilindro. O cilindro, dependendo do fim pretendido, pode ser capaz de atuar apenas num sentido (cilindro de simples efeito) ou em ambos os sentidos, possibilitando carregamentos em tração e compressão (cilindro de duplo efeito). No esquema da Figura 3.2, está representado o funcionamento dum cilindro dentro do qual é introduzido/removido um fluido pelos orifícios: as diferenças de pressão hidráulica induzidas no interior do cilindro fazem com que o êmbolo se movimente. O atuador é portanto capaz de exercer forças/deslocamentos controlados mediante o controlo da pressão no cilindro. Por questões funcionais, na Figura 3.2 admite-se que os esforços de tração são aplicados na direção da seta azul e os esforços de compressão na direção da seta vermelha.

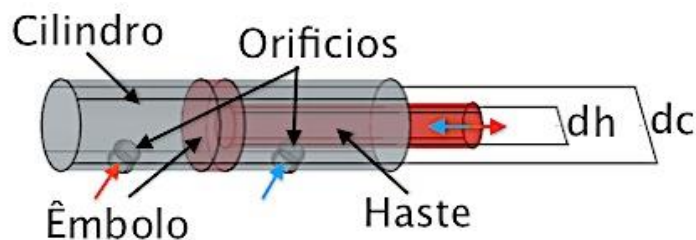


Figura 3.2- Desenho esquemático de um cilindro hidráulico

A vedação dos cilindros hidráulicos deve ser cuidadosamente executada/dimensionada, de forma a não ocorrerem perdas do fluido para o exterior do mesmo, que possam conduzir a perdas de pressão no seu interior e, conseqüentemente, diminuições de carga. Esta vedação deve ter em conta não só a pressão de trabalho para o qual o cilindro é dimensionado, bem como o tipo de desgaste que terá ao longo do tempo.

O dimensionamento de um atuador inicia-se com os requisitos para o qual será utilizado o cilindro, isto é, a pressão nominal máxima admissível e a força que se pretende alcançar. Tendo os parâmetros anteriores de critérios de entrada, torna-se possível calcular o diâmetro do cilindro. A título exemplificativo, representa-se, de seguida, o dimensionamento de um cilindro para exercer esforços de tração. Para tal, admite-se que a pressão interior máxima admissível é de $100\text{Bar}(= 0,1\text{MPa})$ e que a capacidade máxima de carga pretendida é de 50kN .

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 3.1}$$

$$\Leftrightarrow 0,1 * 10^6 = \frac{50 * 10^3}{A} \Leftrightarrow A = 0,005\text{m}^2$$

Assim, de acordo com a convenção de esforços atrás mencionada, para que o cilindro consiga atingir os 50kN à tração, a diferença entre a área do êmbolo (considerando $A_c = A_e$) e a área da haste tem que ser de pelo menos $0,005\text{m}^2$. Deste modo, admitindo que a haste terá um diâmetro de d_h , então o cilindro terá um diâmetro de:

$$A_c - A_h \geq 0,005 \Leftrightarrow \frac{\pi d_c^2}{4} - \frac{\pi d_h^2}{4} \geq 0,005 \Leftrightarrow d_c \geq \sqrt{\left(0,005 + \frac{\pi d_h^2}{4}\right) * \frac{4}{\pi}} \Leftrightarrow$$

$$d_c \geq \sqrt{\frac{0,02}{\pi} + d_h^2}$$

Supondo que $d_h = 0,05\text{m}$:

$$d_c \geq \sqrt{\frac{0,02}{\pi} + 0,05^2} \geq 0,094\text{m} = 9,4\text{cm}$$

Um dos requisitos deste problema é que o cilindro não atinja pressões superiores a 100Bar . De forma a folgar esta pressão, pode ser aumentada a área do cilindro/êmbolo, sendo obtida a carga requerida, mas desta vez para uma pressão de trabalho mais baixa. Desta forma, além da pressão máxima não ser atingida, o desgaste do cilindro é ainda menor, com o decorrer do tempo.

3.2 Atuadores com molas

Na revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, apenas foi encontrado um sistema de ensaio que reportava o uso de atuadores com molas. Aly et al. (2008) executaram um dispositivo de ensaio para a condução de ensaios de retração restringida ativa utilizando uma caixa redutora juntamente com duas molas que induzem os esforços requeridos, como é possível observar na Figura 2.8. Neste sistema, as molas são utilizadas no aumento da flexibilidade do sistema e permitem o controle das deformações aplicadas por um atuador a olho nu, sendo impossível aplicar esforços num corpo sem a utilização de um dispositivo secundário. Em Aly et al. (2008), é a caixa redutora que insere a carga no sistema, ou seja, (ver Figura 2.8) havendo necessidade de aplicar esforços de tração no provete, é rodado o volante que se encontra ligado à caixa redutora, e, por consequência, a viga transversal da direita move-se no sentido das setas, conduzindo à deformação das molas. A compressão exercida sobre as molas tem como reação a tração induzida no provete de ensaio.

Segundo Budynas e Nisbett (2006) a mola é potencialmente considerada como um corpo que exibe a flexibilidade que o criador lhe resolver dar. Na Figura 3.3 estão representados os parâmetros intervenientes de uma mola: d , o diâmetro do arame; D , o diâmetro da mola; L_0 , o comprimento livre; L_s , o comprimento sólido; e N_a , o número de espiras ativas;

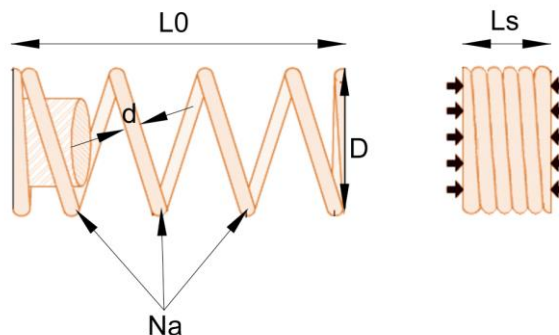


Figura 3.3- Esquema dos parâmetros referentes a uma mola

As molas são utilizadas para diferentes fins, como tal, cada uma deverá ser dimensionada para o efeito que será utilizada. Entre elas existem as molas de compressão, tração, torção e belleville, tal como representado na Figura 3.4. As belleville são molas que se assemelham a anilhas deformadas, que são utilizadas quando o espaço para a sua inserção é escasso. Estas podem ser dispostas em série, aumentando a flexibilidade do conjunto, ou em paralelo, de

forma a aumentar a carga aplicada. Também existem tipos de molas alternativas. As molas de carga constante, que, como o nome indica, são utilizadas para a aplicação de cargas constantes, são originárias das molas de tração. As molas em voluta, em que o arame deixa de ter a forma arredondada e passa a ter uma geometria esbelta, há medida que sofrem esforços de compressão, o número de espiras ativas diminui. Finalmente, as molas cónicas são semelhantes às molas em voluta, pois têm a mesma forma, mas o arame utilizado é circular, tendo a particularidade de o seu comprimento sólido ser igual ao seu diâmetro do arame.



Mola de compressão



Mola de tração



Mola de torção



Mola belleville



Mola de carga constante



Mola em voluta



Mola cónica

Figura 3.4- Representação de molas preparadas para diferentes fins

Analisa-se, de seguida, a possibilidade de uso de mola em conjunto com um sistema porca/parafuso para aplicação de força, tal como exemplificado na Figura 3.5. Sabendo-se que, para o objetivo referido no início do Capítulo 3, em que se requer o dimensionamento de um

atuador de alta flexibilidade e de deformação proporcional à carga aplicada, possibilitando o conhecimento da carga do sistema, através da observação da deformação de um dado elemento, julgou-se que a utilização de uma mola, juntamente com uma ligação parafuso-porca, poderia desempenhar uma alternativa para a concepção do novo sistema. Para este efeito, será exclusivamente realizado o dimensionamento de uma mola de compressão, dado que a ligação parafuso-porca será aprofundada num capítulo seguinte. Todo este processo foi realizado com o recurso a um livro da disciplina de órgãos de máquinas do curso de Engenharia Mecânica, escrito por Budynas e Nisbett (2006).

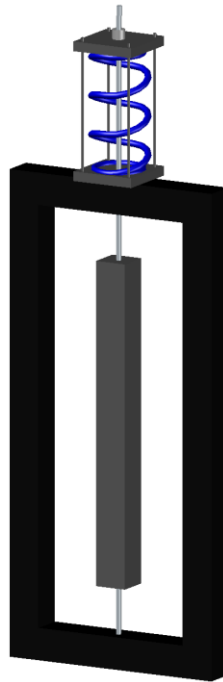


Figura 3.5- Sistema de ensaio com parafuso-porca e mola

O dimensionamento de uma mola requer o conhecimento de alguns parâmetros, com o intuito de encontrar a melhor solução para o problema. Seguidamente, serão analisados os parâmetros de entrada para o seu dimensionamento, sabendo que algumas das siglas que fazem parte destes se encontram explicadas na Figura 3.3:

- F , força máxima que a mola estará sujeita;

$$F = 50kN$$

- y , deformação máxima da mola, e k , rigidez da mola;

A deformação máxima da mola resulta da rigidez que se pretende inserir no sistema. Uma vez que se pretende um sistema de grande flexibilidade, para que, quando a retração do provete atinja o limite de deformação, admitindo $\approx 10\mu\epsilon$, a carga imposta para a reposição do mesmo, possa ser conhecida através da observação da deformação da mola. A carga resultante da aplicação de uma deformação de $10\mu m$ num provete armado pode ser calculada através da Eq. 3.3. Considerando uma deformação $10\mu m$ sobre um comprimento de $550mm$, num provete de betão armado de secção transversal $0,1 \times 0,1m^2$, com um varão $\phi 16$, de módulo de elasticidade do aço $E_s = 200GPa$ e do betão $E_c = 30GPa$, a carga a que o provete ficará sujeito é dada por:

$$\sigma = E\epsilon \quad \text{Eq. 3.2}$$

$$N = E_c \frac{\Delta L}{L} \left(A_c + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) A_s \right) \quad \text{Eq. 3.3}$$

$$N = 30 \times 10^6 \times \frac{0,00001}{0,55} \times \left(0,1 \times 0,1 + \left(\frac{200}{30} - 1 \right) \times \frac{0,016^2 \pi}{4} \right)$$

$$N = 6kN$$

Para que esta reposição seja observável, reposição essa que corresponda aproximadamente a $6kN$, seria pertinente que a mola se deformasse, a título de exemplo, em $1,2cm$. Sendo assim, admitindo que para cada aplicação de $6kN$ é observada uma deformação na mola de $1,2cm$, pode ser retirada a respetiva rigidez:

$$k = \frac{F}{y} \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$k = \frac{6 \times 10^3}{0,012} = 500kN/m$$

A rigidez da mola será de $500kN/m$, enquanto a deformação máxima:

$$k = \frac{F}{y} \Leftrightarrow y_{max} = \frac{F_{max}}{k} = \frac{50}{500} = 0,1m$$

A deformação máxima da mola é de $0,1m$.

- C , índice da mola;

O índice da mola representa a relação entre o diâmetro da mola e o diâmetro do arame. O índice deve assumir valor entre 4 e 12.

$$C = \frac{D}{d} \quad \text{Eq. 3.5}$$

- L_s , comprimento sólido da mola;

Comprimento da mola na sua deformação máxima:

$$L_s = dN_t \quad \text{Eq. 3.6}$$

- L_0 , comprimento total da mola;

Comprimento da mola descarregada:

$$L_0 = L_s + y \quad \text{Eq. 3.7}$$

- L_{cr} , comprimento crítico da mola ($L_{cr} > L_0$);

Comprimento máximo da mola:

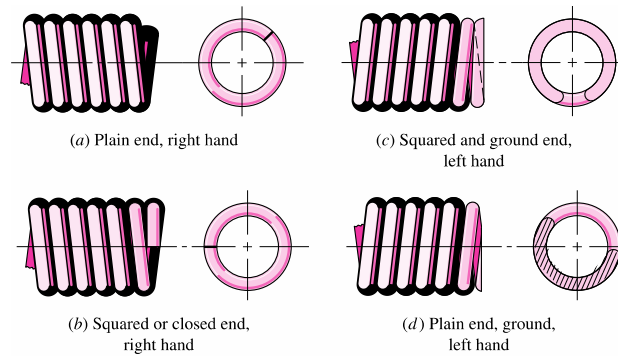
$$L_{cr} = \frac{2,63 \times D}{\alpha}, \alpha = 0,5 \quad \text{Eq. 3.8}$$

- N_a , número de espiras ativas;

O número de espiras ativas pode ser calculado através da Eq. 3.9. Para tal, é necessário saber o d , diâmetro do arame, G , que representa o módulo de distorção do material utilizado para a mola, D , o diâmetro da mola e k , a rigidez da mola. O número de espira ativas deve estar compreendido entre 3 a 15.

$$N_a = \frac{d^4 G}{8D^3 k} 3 \quad \text{Eq. 3.9}$$

- N_t , número total de espiras;



Term	Type of Spring Ends			
	Plain	Plain and Ground	Squared or Closed	Squared and Ground
End coils, N_e	0	1	2	2
Total coils, N_t	N_o	$N_o + 1$	$N_o + 2$	$N_o + 2$
Free length, l_0	$pN_o + d$	$p(N_o + 1)$	$pN_o + 3d$	$pN_o + 2d$
Solid length, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Pitch, p	$(l_0 - d)/N_o$	$l_0/(N_o + 1)$	$(l_0 - 3d)/N_o$	$(l_0 - 2d)/N_o$

Figura 3.6- Informações sobre tipo de molas e sua geometria retiradas de Budynas e Nisbett (2006)

Opta-se por escolher uma mola com as duas extremidades ancoradas em duas placas metálicas paralelas, tal como exemplificado na Figura 3.5, conseqüentemente, através da Figura 3.6, conclui-se:

$$N_t = N_a + 2 \quad \text{Eq. 3.10}$$

- τ_{max} , tensão de corte máxima da mola;

A tensão de corte máxima da mola não deve ultrapassar cerca de 40 – 50% da resistência à tração referente ao material para a mola. Para o dimensionamento será considerado que a mola será executada em arame temperado em óleo, sendo as suas propriedades mecânicas referidas segundo a norma ASTM A229. O arame temperado em óleo pode assumir diferentes valores de resistência à tração, como tal, foi admitido o valor médio das resistências:

$$s_{ut} = 1675MPa$$

Como tal, a resistência ao corte da mola virá:

$$s_{sy} = 0,45s_{ut} = 753,75MPa$$

$$\tau_{max} = K_w \frac{8FC}{\pi d^2} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Em que:

$$K_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C}$$

Em que a tensão de corte da mola deverá ser inferior à resistência ao corte do material utilizado:

$$s_{sy} \geq \tau_{max} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Agora, será elaborado o dimensionamento da mola, propriamente dito, resultante de várias iterações para atingir a solução ideal, englobando todos os parâmetros anteriores, como é possível observar na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Tabela de iterações para o dimensionamento da mola de compressão

d (m)	0,035								
C	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D (m)	0,14	0,18	0,21	0,25	0,28	0,32	0,35	0,385	0,42
F (kN)	50								
y (m)	0,1								
k (kN/m)	500								
Na(3-15)	10,9	5,6	3,24	2,04	1,367	0,96	0,7	0,526	0,41
Nt	12,9	7,6	5,24	4,04	3,367	2,96	2,7	2,526	2,41
Ls(m)	0,45	0,27	0,18	0,14	0,118	0,1	0,0945	0,088	0,08
L0 (m)	0,55	0,37	0,28	0,24	0,218	0,2	0,1945	0,188	0,18
Lcr(>L0) (m)	0,74	0,92	1,1	1,29	1,473	1,66	1,841	2,025	2,21
Kw	1,4	1,31	1,25	1,21	1,184	1,16	1,1448	1,131	1,12
τ (Mpa)	584	681	781	882	984,5	1087	1189,9	1293	1396
0,45sut	753,75								

Posteriormente, ter-se-ia ainda que calcular a resistência à tração do parafuso concêntrico com a mola, responsável pela transmissão de carga ao provete de betão armado. Este raciocínio, como já foi referido, será tido em conta no capítulo sobre a ligação parafuso/porca, por se considerar mais conveniente a explicação nesse momento.

Analisando a Tabela 3.1 conclui-se que:

- N_a , cumpre os requisitos para os diâmetros {0,14; 0,18; 0,21};
- L_{cr} , verifica os requisitos para todos os diâmetros;
- τ_{max} , obedece aos requisitos para os diâmetros {0,14; 0,18};

Conclui-se assim, que a mola ideal para a conceção do dispositivo em vista, tem diâmetro de arame de: $d = 35mm$, diâmetro da mola de: $D = 180mm$, para um comprimento livre de: $L_0 = 370mm$. De facto este tipo de molas só é fabricado até diâmetros máximos que rodam $d \leq 12,7mm$, como tal, esta alternativa terá que ser abandonada. Em termos de capacidade resistente, a mais próxima, encontrada num catalogo de uma empresa (*Lesjofors*), tem um diâmetro de $D = 50mm$, um eixo interno com $25mm$ de diâmetro, comprimento livre de $L_0 = 305mm$ e suporta uma carga máxima de $F = 27,16kN$, permitindo que permite uma deformação máxima de apenas $y = 70mm$. Esta mola, conhecida como “*Die Spring*”, tem uma configuração diferente das casuais molas de compressão, pois a secção transversal do arame tem a forma trapezoidal e suporta cargas superiores sob deformações mais reduzidas, podendo ser observado um exemplo na Figura 3.7. Na verdade, idealizando as dimensões desta “*Die Spring*”, conclui-se que se trata de uma mola bastante robusta.



Figura 3.7- Exemplificação de uma *Die Spring*

No caso das molas utilizadas por Aly et al. (2008), que simulou experiências em provetes de betão sujeitos à restrição ativa, admitindo que este assume como critério de paragem o instante em que o provete é fissurado, supõe-se que o seu sistema, exemplificado na Figura 2.8, atinja uma carga de, aproximadamente, $17kN$. Sendo assim, cada mola utilizada, por este, terá autonomia de, sensivelmente, $8,5kN$. Observando as molas de Aly et al. (2008) e

comparando com as dimensões da mola dimensionada, pode constatar-se que é perfeitamente possível o resultado destes cálculos, mesmo utilizando uma rigidez muito superior à do autor anterior. Infelizmente, torna-se uma tarefa bastante difícil descobrir uma mola com as dimensões requeridas no mercado, como tal, uma das soluções seria a utilização de várias molas helicoidais em paralelo, ou mesmo a substituição das molas de compressão por molas belleville. Na Figura 3.8 estão representados os parâmetros intrínsecos de uma mola belleville, retirados de um catálogo de uma empresa (*SPIROL*).

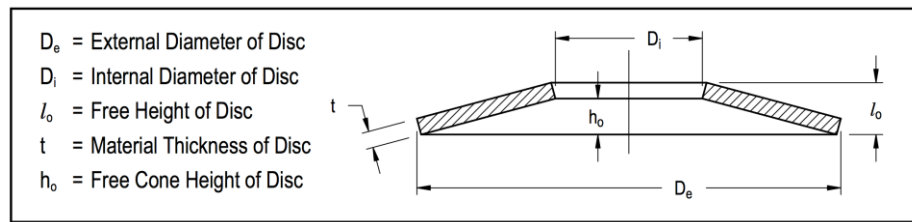


Figura 3.8- Representação de uma mola belleville (*SPIROL*)

Supondo que se pretende a utilização de molas belleville, propõe-se a utilização de 6 molas dispostas em série, como representado na Figura 3.9. Cada uma com diâmetro exterior $D_e = 70mm$, diâmetro interior $D_i = 40,5mm$, espessura $t = 5mm$, deformação máxima $h_o = 1,4mm$ e resistência máxima $F_{max} = 51,2kN$. Deste modo, é possível alcançar os esforços pretendidos no início do problema e a sua associação em série confere uma maior flexibilidade ao sistema. Se fosse somente utilizada uma mola, ter-se-ia uma rigidez do sistema de $K_{1mola} = 36,571MN/m$, o que permitiria reduzir a rigidez para $K_{6molas} = 6,1MN/m$. Apesar disso, resulta uma rigidez bastante superior à que é referida no início do problema, o que torna bastante difícil a observação das deformações que ocorrem nas molas provocadas pela pessoa que conduz o ensaio.

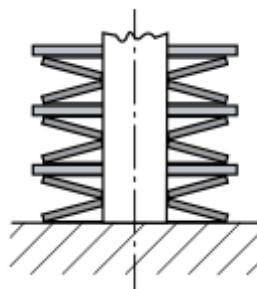


Figura 3.9- Disposição das molas belleville em série

3.3 Atuadores com engrenagens

Segundo consta em Budynas e Nisbett (2006) as forças transmitidas entre engrenagens em movimento, fornecem momentos de torção nos seus eixos, proporcionando a transferência de energia, e, como tal, de forças e momentos, exemplificadas na Figura 3.10. Este tipo de sistema pode ser utilizado com intuito de desmultiplicar um determinado esforço, ou determinado deslocamento. A relação entre os raios ou velocidades angulares entre duas engrenagens permite o aumento de uma carga ou a diminuição de um deslocamento, ou seja, se um destes sistemas for utilizado por um operador, este quando aplica a rotação numa engrenagem, a segunda, devido à transmissão de movimento, vai rodar também.

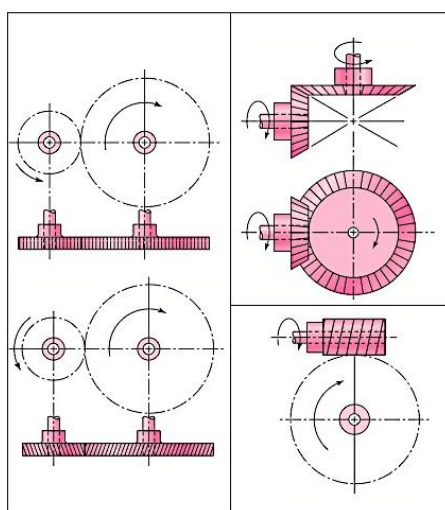


Figura 3.10- Sistemas de engrenagens associadas em série (a) Engrenagem simples e helicoidal; (b) Engrenagem cônica; (c) Engrenagem com sem fim; retiradas de Budynas e Nisbett (2006)

O movimento de uma associação de duas rodas dentadas é possível através dos dentes, que se desenvolvem ao longo do perímetro destas, dado que o encaixe dos dentes das duas rodas constitui a transmissão de movimento de uma roda para outra. A potência gerada pela rotação das rodas é considerada constante ao longo do sistema, uma vez que resulta da translação de movimento decorrente do encaixe dos dentes de cada roda, conforme representado na Figura 3.11. Estes dentes, de ambas as rodas, com a mesma geometria, encaixam-se perfeitamente, o que proporciona o maior rendimento possível, são dimensionados para os esforços que estarão sujeitos. Contudo, o dimensionamento dos mesmos não será abordado neste estudo.

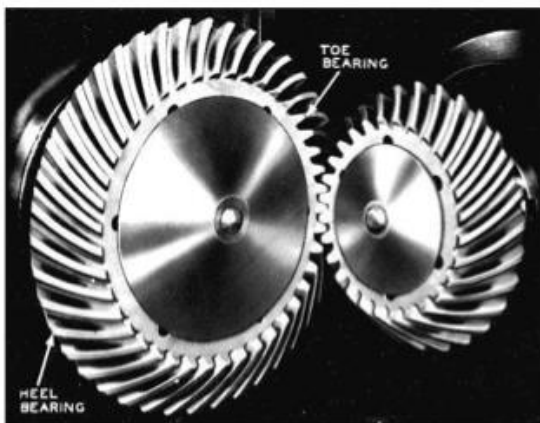


Figura 3.11- Pormenor do encaixe dos dentes de uma engrenagem

Aly et al. (2008), já citado anteriormente, e Silva (2011) utilizaram dispositivos de aplicação de carga recorrendo a engrenagens, representados na Figura 2.8 e Figura 3.12, respetivamente.



Figura 3.12- Sistema de ensaio desenvolvido por Silva (2011)

Estes sistemas utilizam rodas dentadas para aplicar esforços superiores aos que seriam possíveis por aplicação manual Aly et al. (2008), ou por um pequeno motor Silva (2011). Assim, com o recurso a desmultiplicadores, além de conseguirem atingir cargas superiores, ainda permitem originar deformações bastante mais refinadas num provete. Nenhuma referência foi encontrada acerca da relação de movimento existente entre as duas engrenagens utilizadas por Silva (2011). Contudo, através da observação da Figura 3.12, aponta-se que terá sido adotada uma relação de, aproximadamente, 1:3. Se assim for e se o momento torsor do motor e da roda, à qual está ligado, for constante, resultará que o motor aplica esforços três

vezes inferiores ao que a roda de maior diâmetro aplica no provete e, como tal, também aplicará deslocamentos três vezes superiores ao da mesma roda.

O índice de desmultiplicação está diretamente relacionado com o diâmetro das duas rodas, isto é, quanto maior for a desmultiplicação, maior será a relação dos diâmetros das duas.

$$e = \frac{d_1}{d_2} = \left| \frac{\omega_2}{\omega_1} \right| \quad \text{Eq. 3.13}$$

Sendo e , o índice de desmultiplicação, d_1 e d_2 os diâmetros das engrenagens e ω_1 e ω_2 as velocidades angulares das rodas, a expressão anterior permite provar que o diâmetro da roda é inversamente proporcional à velocidade angular, então, logicamente, que a velocidade rotacional de uma roda com diâmetro menor é superior à de uma roda de diâmetro maior (admitindo que as rodas se encontram dispostas em série). Tal como nos capítulos anteriores, será efetuado o dimensionamento de um sistema capaz de exercer cargas de $50kN$, com o recurso a Budynas e Nisbett (2006). Propõe-se a utilização de duas rodas dentadas, de dentes planos, uma das rodas, a roda2, é ligada ao provete através de um varão roscado tipo $M16$ e a outra roda, roda1, terá um braço concêntrico permitindo a rotação manual desta, tal como pode ser observado na Figura 3.13.

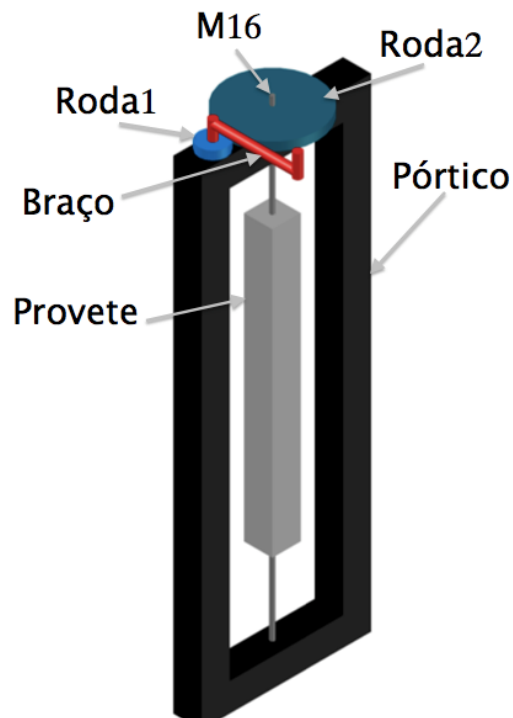


Figura 3.13- Sistema de ensaio com atuador formado por engrenagens

Os dados de entrada para este problema serão os $50kN$ que se pretendem aplicar ao provete admitindo-se que o braço de rotação manual estará sujeito a um esforço de $25kg$. Supõem-se que o braço de rotação manual estará sujeito a um esforço de $25kg$ por se tratar de uma carga relativamente baixa e facilmente aplicável por qualquer operador.

A nomenclatura utilizada para as forças (F) e momentos torses (T) que serão objeto de estudo neste dimensionamento podem ser observadas na Figura 3.14, sendo (r1), (r2) e (b), o raio da roda1, o raio da roda2 e o braço de rotação manual, respetivamente. O raciocínio necessário para o dimensionamento deste sistema pode ser entendido da seguinte forma: a rotação do braço manual, produz um determinado momento torsor, T_b , que por sua vez é transmitido à roda1, T_{r1} , sendo $T_b = T_{r1}$. O momento torsor que foi gerado na roda1 será transmitido à roda2, resultando um novo momento torsor, T_{r2} . O movimento da roda2, provocado pela translação da roda1, produz um momento torsor no varão roscado M16, T_{M16} , em que $T_{r2} = T_{M16}$. Neste momento, passar-se-á ao dimensionamento propriamente dito.

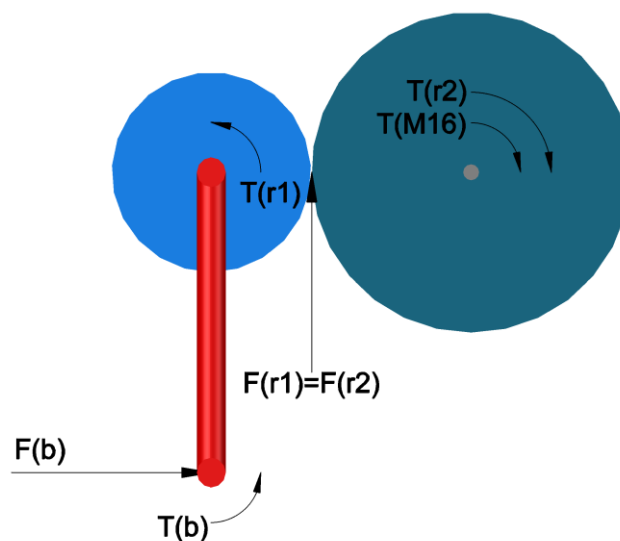


Figura 3.14- Representação das variáveis para o dimensionamento das engrenagens

O momento torsor necessário para aplicação de $50kN$ no provete, pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$T_{M16} = KF d_{M16} \quad \text{Eq. 3.14}$$

Sendo T , o momento torsor, K o parâmetro que tem em conta o atrito entre o M16 e a roda2 à qual está ligado, neste caso uma chumaceira de forma a poder girar, como tal o atrito reduzido diminui, F a carga requerida e d o diâmetro do M16. A Eq. 3.14 será analisada/utilizada no capítulo que estuda a ligação parafuso/porca. De seguida, ter-se-ia ainda que contabilizar a resistência à tração do M16 e a resistência ao corte da roda2 (na interface varão-roda), sendo também este tipo de verificações tratadas no capítulo sobre a ligação parafuso/porca.

$$T_{M16} = 0,3 \times 50 \times 10^3 \times 0,016 = 240N.m$$

O momento torsor que seria aplicado no varão para atingir os $50kN$, é o mesmo aplicado pela roda2, como tal:

$$T_{M16} = T_{r2} = F_{r2} \frac{d_{r2}}{2} \quad \text{Eq. 3.15}$$

$$F_{r2} \frac{d_{r2}}{2} = 240N.m$$

Pela compatibilidade de esforços é possível concluir que a carga tangencial resultante na roda2 é igual à carga tangencial resultante da roda1, porque estas se encontram encaixadas e o movimento de uma levará à rotação da outra:

$$F_{r2} = F_{r1} \quad \text{Eq. 3.16}$$

A carga F_{r1} gera um determinado momento torsor na roda1, dado por:

$$F_{r1} \frac{d_{r1}}{2} = T_{r1} \quad \text{Eq. 3.17}$$

O momento torsor na roda1 é o mesmo momento aplicado manualmente no braço concêntrico, como tal:

$$T_{r1} = T_b = F_b L_b \quad \text{Eq. 3.18}$$

Perante o que foi explicada até ao momento e admitindo um comprimento para o braço de rotação manual, é possível chegar à relação entre os diâmetros das rodas, através da seguinte expressão:

$$\frac{F_{r1} \frac{d_{r1}}{2}}{F_{r2} \frac{d_{r2}}{2}} = \frac{F_b L_b}{T_{M16}} \quad \text{Eq. 3.19}$$

Neste caso, para um braço com $0,3m$ (valor admitido) e considerando que a força aplicada no braço é de $25kg$ e o momento torsor aplicado no varão $M16$ é de $T_{M16} = 240N.m$, é possível simplificar a expressão anterior:

$$\frac{\frac{d_{r1}}{2}}{\frac{d_{r2}}{2}} = \frac{0,25 \times 10^3 \times L_b}{240} \quad \text{Eq. 3.20}$$

$$\frac{d_{r1}}{d_{r2}} = \frac{0,25 \times 10^3 \times 0,3}{240}$$

$$\frac{d_{r1}}{d_{r2}} = 0,3125 \Rightarrow e = 3,2$$

É de esperar que quanto menor for o braço, maior será a desmultiplicação, sendo o comprimento do braço, admitido neste calculo, meramente exemplificativo. Sabendo a relação dos diâmetros das rodas é possível admitir o número de dentes das mesmas. A título de exemplo, porque não serão dimensionados nesta análise, supondo que a roda1 tem 10 dentes, a roda2 terá 32, sendo assim, enquanto a roda1 gira 3,2 vezes, a roda2 gira, apenas, uma vez, e por conseguinte, se a roda1 tiver $d_{r1} = 0,1m$, a roda2 terá $d_{r2} = 0,32m$, tal como é possível observar na Figura 3.15. Alternativamente, e como foi referido anteriormente, poder-se-ia reduzir o comprimento do braço o que resultaria no aumento da relação dos diâmetros das engrenagens. A redução do braço para metade, $L_b = 0,15m$, provocaria uma relação de movimento entre as engrenagens de $e = 6,4$.

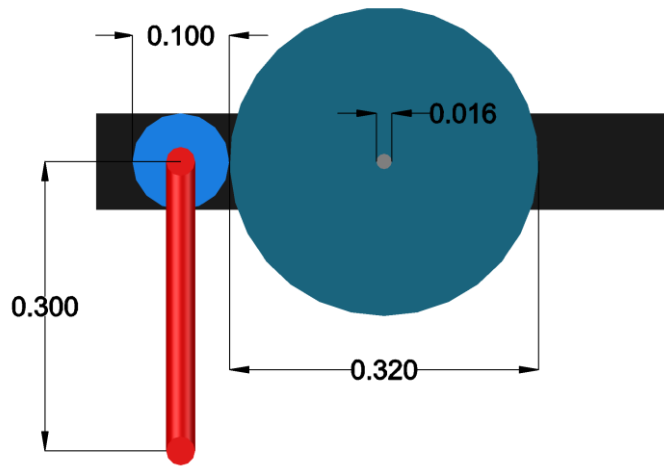


Figura 3.15- Dimensões do sistema de engrenagens (m)

Posteriormente, relaciona-se a deformação do dispositivo com a carga aplicada, para melhor compreensão do seu desempenho durante o ensaio. Para tal, será necessário conhecer totalmente a geometria do ensaio, ou seja, o comprimento absoluto do varão e o comprimento do provete a ensaiar, bem como as características mecânicas dos materiais, entre os quais os módulos de deformabilidade do varão e do provete. Admitindo que é efetuada uma rotação completa da roda 2, que corresponde a aplicação de um binário de subida no parafuso, cujo binário coincide com a aplicação de uma deformação igual ao comprimento do passo do parafuso, é possível retirar a respetiva carga resultante, como se encontra no raciocínio a baixo:

Deformação aplicada:
$$1rot_{r2} = p_{M16} = \Delta L \quad \text{Eq. 3.21}$$

$$\sigma = \varepsilon E \Leftrightarrow N = \frac{\Delta L}{L} EA$$

$$\Delta L = \frac{NL}{EA} \quad \text{Eq. 3.22}$$

Seguindo o princípio da Eq. 3.22 é possível calcular o esforço resultante da aplicação de uma deformação de comprimento igual ao passo do parafuso, correspondendo a uma rotação completa da roda2, ou seja:

$$\Delta L = N \left(\frac{L_{s,sup}}{E_s A_s} + \frac{L_{rc}}{E_c (A_c + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right) A_s)} + \frac{L_{s,inf}}{E_s A_s} \right) \quad \text{Eq. 3.23}$$

A expressão anterior encontra-se deduzida em Anexo, que corresponde ao capítulo 7.2. Na medida em que $\Delta L = 2mm$, $L_{s,sup}$ e $L_{s,inf} = 0,3m$, $E_s = 200GPa$, $L_{rc} = 1m$, e $E_c = 30GPa$ determina-se que a carga para uma rotação da roda2:

$$0,002 = N \left(\frac{2 \times 0,3}{200 \times 10^6 \times \frac{0,016^2 \times \pi}{4}} + \frac{1}{30 \times 10^6 \left(0,1 \times 0,1 + \left(\frac{200}{30} - 1\right) \times \frac{0,016^2 \times \pi}{4} \right)} \right) \Leftrightarrow$$

$$N = 99,96kN \approx 100kN$$

A rotação completa da roda2 corresponde à aplicação de uma carga de $100kN$, sendo que manualmente ter-se-á que girar o braço concêntrico até serem atingidas $3,2rot$. Deste modo, para a aplicação de $6kN$ no provete, que corresponde à aplicação de um deslocamento de $10\mu m$ num comprimento de $550mm$, possibilidade que foi estudada no subcapítulo anterior, ter-se-ia que aplicar uma rotação de $21,6^\circ$ na roda2, o que corresponderia a uma rotação de $69,12^\circ$ no braço. Conclui-se assim, acerca da facilidade que se teria na aplicação de carga, proporcionando uma aplicação de deslocamentos bastante mais controlada e, portanto, refinada.

3.4 Atuadores de aperto manual

As ligações de aperto manual, no seu caso mais simples, são constituídas por um parafuso e uma porca. O funcionamento desta ligação é semelhante ao de uma engrenagem, na medida que o parafuso fica sujeito a esforços quando é executada a rotação da porca.

Na literatura citada no Capítulo 2, foram encontrados dois documentos que referem dispositivos preparados para ensaios de retração impedida bastante similares à ligação de aperto manual, que serão objeto de estudo neste subcapítulo. O primeiro documento foi elaborado por Bloom e Bentur (1993), representado na Figura 2.5, e o segundo por Veiga (1997), representado na Figura 3.16.



Figura 3.16- Sistema de ensaio desenvolvido por Veiga (1997)

De forma a elaborar um sistema de ensaio de retração ativa à deformação, estudou-se a possibilidade de aplicação da força por aperto de um parafuso através de uma porca, tal como exemplificado na Figura 3.17.

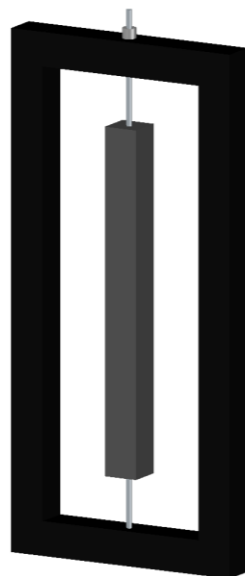


Figura 3.17- Sistema de ensaio com ligação parafuso-porca

Seguindo os pressupostos anteriores, o estudo da ligação de uma porca com um varão roscado tipo M16, contemplará o cálculo da resistência à tração do parafuso, da resistência ao corte da porca, que não foram calculados nos subcapítulos anteriores, por se entender mais vantajoso

explicar, neste cenário, do binário gerado pelo aperto da porca, aplicado também no capítulo sobre as engrenagens, e ainda será uma análise comparativa entre o sistema por aperto e o sistema de engrenagens.

A resistência à tração do parafuso pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$F_{t,Rd} = f_{ub} \times A_s \quad \text{Eq. 3.24}$$

Admitindo que o parafuso resulta da roscagem das extremidades do varão, $\phi 16$ da classe A500, que se encontra embebido no betão, a resistência à tração é dada por:

$$F_{t,Rd} = 500 \times 10^3 \times \frac{0,0141^2 \pi}{4}$$

$$F_{t,Rd} = 78,5kN$$

A resistência à tração do varão de pontas M16 é de $78,5kN$, ou seja, é possível aplicar esforços de $50kN$ no sistema.

A resistência ao corte da rosca da porca, é calcula através do produto da área de contacto entre a porca e o varão e a tensão de corte máxima do material. Normalmente, as porcas para parafusos M16 têm a altura de $12mm$, pelo que, a área sujeita ao corte é dada por:

$$A_v = P \times h \quad \text{Eq. 3.25}$$

$$\pi \times (0,016) \times (0,012) = 0,0006m^2$$

Considerando-se uma tensão de corte na ordem dos $350MPa$ (valor admitido):

$$\tau_v = \frac{N}{A_v} \quad \text{Eq. 3.26}$$

Portanto,

$$N = 0,0006 \times 350 \times 10^3 = 211,1kN$$

A resistência ao corte da porca é bastante superior à resistência à tração do M16, como tal, nesta fase já é possível concluir que o esforço preponderante será a resistência à tração do “parafuso”.

O binário de aperto pode ser entendido como o momento torsor, que terá de ser aplicado no aperto da porca para que esta origine determinado esforço axial de tração, resultante do deslizamento dos dentes do parafuso nos dentes da porca (T_r) e, ainda, do deslizamento da base da porca na superfície do pórtico (T_c), tal como pode ser consultado em Budynas e Nisbett (2006). Este binário é, portanto, dividido em duas parcelas, isto é:

$$T = T_r + T_c \quad \text{Eq. 3.27}$$

Sendo F , a força que se pretende atingir com o sistema, d_m o diâmetro médio do varão, f o coeficiente de fricção que resulta do atrito gerado na interface entre a rosca da porca e do parafuso (gerado por T_r), l o passo do parafuso, f_c o coeficiente de fricção que resulta do atrito gerado na interface entre a porca e a superfície de contacto com esta (gerado por T_c), e d_c o diâmetro da porca, em Budynas e Nisbett (2006) concluíram a seguinte equação:

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad \text{Eq. 3.28}$$

Contudo, devido à dificuldade associada à contabilização de f e f_c , que dependem de diversos parâmetros, tais como, a geometria e as superfícies que se encontram em contacto, após algumas deduções elaboradas, Budynas e Nisbett (2006) recomenda a utilização da seguinte expressão:

$$T = K F_i d \quad \text{Eq. 3.29}$$

Em que:

$$K = \left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + f \sec \alpha}{1 - f \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0,625 f_c$$

Sendo $\tan \lambda = \frac{l}{\pi d_m}$, é o ângulo de inclinação do filete do parafuso, e α , representa metade do ângulo formado entre o diâmetro mínimo (intersecção entre dois filetes) e o diâmetro máximo (pico máximo de um filete) do parafuso, tal como é possível observar na Figura 3.18.

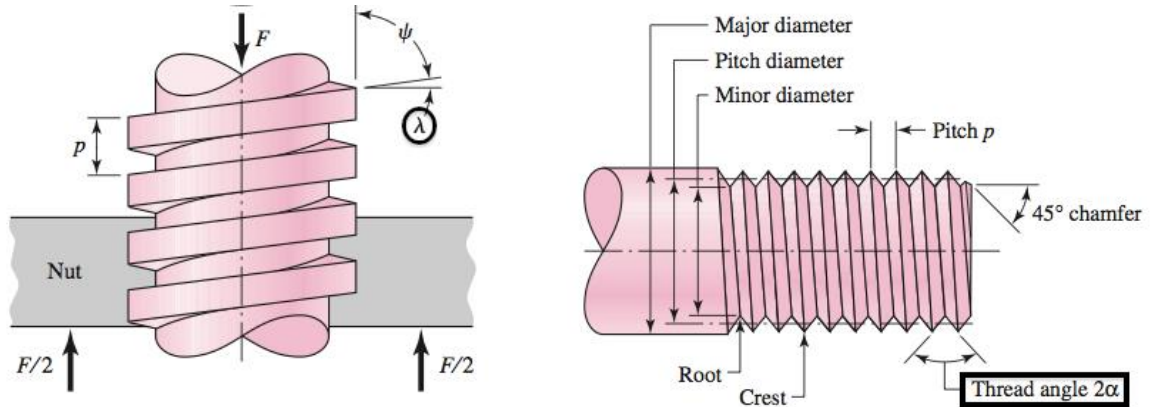


Figura 3.18- Esquema detalhado de parâmetros de interesse (λ e α)

Alternativamente, ainda são propostos alguns valores de K, que contabilizam o atrito criado na ligação parafuso-porca e porca-superfície de contacto, como se encontra na Tabela 3.2.

Tabela 3.2- Valores de K para diferentes condições de ligação retirados de Budynas e Nisbett (2006)

Condições de ligação	K
Sem acabamento	0,3
Acabamento zincado	0,2
Lubrificado	0,18
Acabamento em estanho	0,16
Produto anti-atrito	0,12
Porca arqueada	0,09

Sendo assim, considerando $K = 0,3$, é possível calcular o momento torsor necessário para aplicar um esforço de $50kN$:

$$T = 0,3 \times 50 \times 10^3 \times 0,016 = 240N.m$$

Se for admitido que o esforço exercido por uma pessoa é de aproximadamente $50kg = 0,5kN$, precisar-se-ia de um braço com o comprimento de:

$$T = F_H \times L_b \quad \text{Eq. 3.30}$$

$$L_b = \frac{0,24}{0,5} = 0,48m$$

Concluindo, necessitar-se-ia de uma chave com um comprimento de $48cm$.

Tal como analisado no subcapítulo anterior, a aplicação de $6kN$ ao sistema seria possível através da rotação da porca com um ângulo de $21,6^\circ$, o que corresponderia, a um deslocamento total do sistema, formado pelo comprimento do varão acima e abaixo do provete e pelo comprimento do provete armado de, aproximadamente, $120\mu m$ e a $10\mu m$ num comprimento de $550mm$ de provete.

Se fosse considerado o mesmo comprimento de braço, quer no sistema de rodas dentadas, quer no sistema de aperto, ou seja, $L_b = 0,3$, concluir-se-ia que o esforço necessário para aplicação de $50kN$ no parafuso seria preciso aplicar um momento torsor com uma força de $80kg$ no sistema de aperto, contrariamente aos $25kg$ utilizados no sistema de rodas dentadas.

$$T = F_H \times L_b \Leftrightarrow 240 = F_H \times 0,3$$

$$F_H = 0,8kN = 80kg$$

É de salientar a diferença entre os dois sistemas analisados nos últimos subcapítulos, quer ao nível da carga aplicada, quer ao nível do controlo da deformação. Tendo em conta todos os dispositivos analisados anteriormente, o sistema de custo inferior é, sem dúvida, o de aperto de parafuso com o auxílio de uma porca. No que toca à relação entre a aplicação de carga por parte da pessoa que executa o ensaio, e as deformações e cargas resultantes que são, efetivamente, aplicadas ao provete, é de notar que o sistema de aperto de parafuso-porca é o sistema com menos vantagens. Todavia, é perfeitamente possível o alcance de cargas elevadas (na ordem dos $50kN$), bem como a aplicação de deformações reduzidas (na ordem dos μm), cumprindo os requisitos para elaboração de um sistema de ensaio de retração restringida ativa.

Na Tabela 3.3 são apresentadas, resumidamente, as vantagens e desvantagens, mais importantes dos sistemas atuadores estudados ao longo deste capítulo. Verifica-se que o atuador de aperto mecânico é o mais vantajoso, uma vez que acarreta custos inferiores em

relação aos outros analisados e cumpre os requisitos funcionais enunciados no início do capítulo. Como tal, este atuador será selecionado como primeira alternativa para vários estudos para validação do seu desempenho no capítulo 4, com a finalidade de perceber a viabilidade da sua utilização para a conceção do novo sistema de ensaio.

Tabela 3.3- Sistemas atuadores estudados

Atuador	Vantagens	Desvantagens
Cilindro hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidade de aplicação de cargas elevadas ▪ Facilidade da aplicação de carga por parte do operador ▪ Reutilizável 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possibilidade de perdas de carga ▪ Necessidade de dispositivos adicionais ▪ Custos associados
Molas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento da flexibilidade do sistema ▪ Conhecimento da carga aplicada ao sistema ▪ Reutilizável 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inexistência de molas do calibre e funcionalidade pretendida ▪ Por si só não possibilita a aplicação de carga, sem a utilização de dispositivo secundário ▪ Custos associados ▪ Possibilidade de deformações internas devido a carregamentos de longa duração
Engrenagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diminuição dos esforços aplicados por parte do operador ▪ Controlo de deslocamentos aplicados bastante mais refinados ▪ Reutilizável 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Espaço necessário para a sua inserção ▪ Custos associados
Aperto parafuso/porca	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Útil para o nível de carga requerido ▪ Facilidade de montagem ▪ Custos associados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dificuldade na aplicação de esforços elevados

4 ADAPTAÇÕES E EXTENSÕES AO SISTEMA DE RESTRIÇÃO ATIVA À DEFORMAÇÃO EXISTENTE NA U.M.

No presente capítulo reporta-se os esforços encetados para fazer face aos problemas observados na elaboração do sistema de ensaio *VRF*, citado no Capítulo 2, tornando-o apto à utilização corrente no contexto de ensaios de restrição às deformações, originadas pela retração. É também contemplada a criação de um sistema complementar de custo controlado para ensaio de provetes armados. Serão demonstradas de forma cumulativa as várias ações realizadas nas duas vertentes principais: (i) adaptações ao sistema de ensaio de provetes não armados; (ii) desenvolvimento de sistema variante para ensaio de provetes armados.

No decorrer do mesmo, serão executados diversos ensaios experimentais para a adaptação e validação do sistema atuador e do sistema de medição de deformações do sistema *VRF*. Em todos eles, será dada uma explicação detalhada dos seus objetivos, métodos e resultados. Os ensaios que incluem a utilização de célula de carga (modelo 619 Tedeo Huntleigh, produzida pela empresa Vishay e suporta uma carga máxima de $50kN$), extensómetros eléctricos (modelo BFLA-5-3 e comercializadas pela TML) ou LVDTs (com precisão de $0,001mm$ e curso de $\pm 2,5mm$, fabricada pela RDP Electronics), implicarão o uso simultâneo dum sistema de aquisição de dados, para o registo e tratamento dos resultados fornecidos pelos mesmos. Recorreu-se à ligação dos módulos NI SCXI-1540 e NI SCXI-1520 (National Instruments) com os terminais frontais NI SCXI-1315 e NI SCXI-1314 onde são ligados os sensores, no interior do sistema de aquisição de dados NI SCXI-1001. Em todos os ensaios que com utilização de um provete de betão, utilizou-se a composição A ou B detalhadas na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 respetivamente, sendo identificada a composição utilizada em cada ensaio na descrição do mesmo. O cimento utilizado é da classe 42,5 e as fibras de aço, de extremidades dobradas, têm $35mm$ de comprimento, fabricadas pela empresa Maccaferri.

Tabela 4.1- Composição do betão A [kg/m^3]

Cimento [<i>kg</i>]	Filer Calcário [<i>kg</i>]	Água Total [<i>kg</i>]	Superplastificante [<i>kg</i>]	Areia Fina [<i>kg</i>]	$\frac{1}{2}$ Areia [<i>kg</i>]	Brita [5 – 12] [<i>kg</i>]	Fibras [<i>kg</i>]
380,5	326,2	126,8	6,1	362,6	574,6	510,1	45,0

Tabela 4.2- Composição do betão B [kg/m^3]

Cimento [kg]	Filer Calcário [kg]	Água Total [kg]	Superplastificante [kg]	Areia Fina [kg]	$\frac{1}{2}$ Areia [kg]	Brita [5 – 12] [kg]	Fibras [kg]
412,3	353,4	138,0	7,8	176,9	644,2	587,5	60,0

4.1 Adaptações ao sistema para ensaio de provetes não armados

4.1.1 Molde

Nos ensaios realizados com a versão anterior do *VRF* por De Sousa (2011), recorria-se a um molde esculpido em placas de poliestireno extrudido (XPS), o que resultava em limitações da sua reutilização, bem como problemas de controlo da geometria (ex: dificuldade em assegurar paralelismo das faces). Tendo como objetivo solucionar os problemas ocorridos na anterior implementação, foi projetado e executado um novo molde, fácil de desmontar, e com a particularidade de ser completamente reutilizável. O molde será utilizado na construção de um provete com uma secção corrente $100 \times 100mm^2$, alargando nas extremidades para uma secção de $160 \times 100mm^2$, tendo um comprimento total de $1000mm$, tal como apresentado na Figura 4.1. A nova cofragem é constituída por uma base em chapa metálica, duas chapas de topo e duas paredes laterais MDF (*Medium Density Fiberboard*) representadas na Figura 4.2 e Figura 4.3. O MDF é um material originário da madeira, fabricado com resinas sintéticas. As paredes do molde são ainda revestidas interiormente por uma película de termolaminado de alta pressão (HPL) que garante a estanquidade à água, correspondente à Figura 4.3 (b). Este tipo de película é fabricado através da aglomeração de camadas de material fibroso de celulose (ex: papel), com resinas termoendurecíveis (resinas de formaldeído), sujeitas a um processo de consolidação numa prensa sobre um ambiente de alta pressão e temperatura.

Note-se que a Figura 4.3 (b) foi captada em fase de construção do molde, sendo que os espaçadores existentes sobre a zona corrente do molde não fazem parte do mesmo. As chapas de topo, utilizadas na primeira versão do *VRF* por De Sousa (2011), voltaram a ser utilizadas tanto na fase de betonagem (pertencendo ao molde), como na fase de ensaio (pertencendo ao provete). Estas chapas foram executadas em aço A275, com uma espessura de $20mm$ e secção transversal equivalente à das extremidades do provete ($160 \times 100mm^2$), conforme

apresentado na Figura 4.1. As mesmas foram desenhadas, inicialmente, para permitirem a condução de ensaios sobre provetes de betão armado, razão pela qual terem os oito furos adicionais, à exceção dos que são utilizados para a inserção dos parafusos de ancoragem das extremidades. As peças em madeira mencionadas foram executadas com recurso a um equipamento de corte de comandos numéricos, assegurando o paralelismo entre as duas placas laterais e o alargamento suave das extremidades. Este alargamento foi realizado de forma a proporcionar uma melhor transferência de esforços da zona de ancoragem do provete para a zona corrente, evitando originar a fendilhação ou mesmo a rotura do provete por concentrações de tensões nestas zonas. O aumento de largura junto às extremidades é efetuado recorrendo a uma equação do 3º grau exemplificada na Figura 4.1. A construção da mesma passa por garantir que os dois pontos mais afastados têm declive nulo, isto é, o ponto que faz parte a extremidade do provete, com secção transversal de $160 \times 100\text{mm}^2$, $f'(0) = 0$ e o ponto que inicia a secção corrente de $100 \times 100\text{mm}^2$, $f'(182) = 0$. Adicionalmente, são necessários mais dois pontos, cujas coordenadas são: $f(0) = 30$ e $f(182) = 0$. Com esta informação, resulta que a expressão geral da curva para a conceção do molde é dada por:

$$y = 9,952 \times 10^{-6}x^3 - 2,717 \times 10^{-3}x^2 + 30 \quad \text{Eq. 4.1}$$

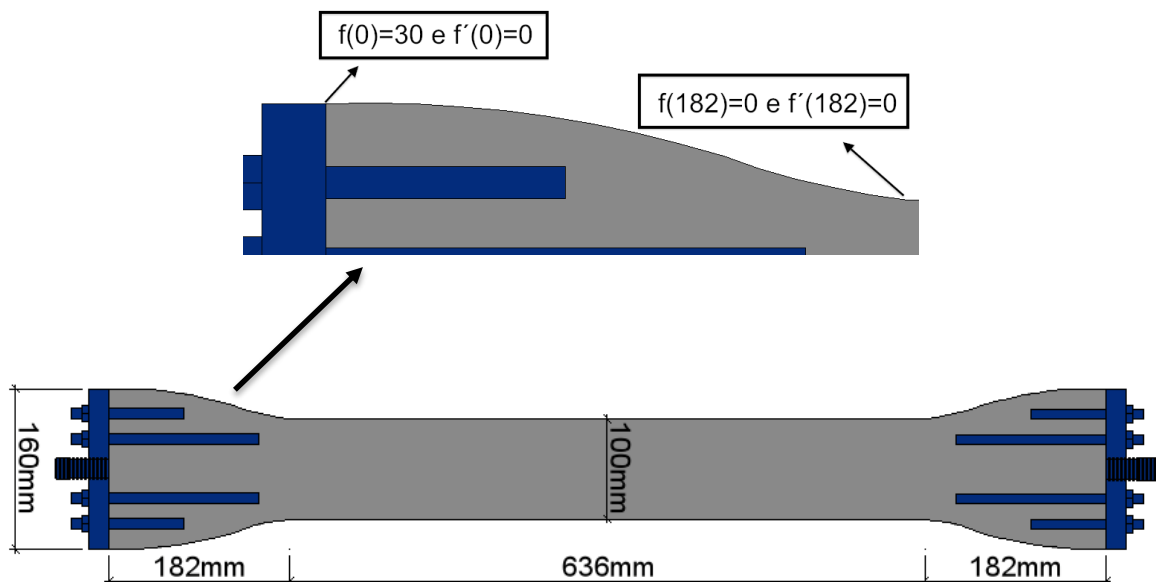


Figura 4.1- Representação do provete utilizado no VRF

As paredes do molde e as chapas de topo são ligadas por cantoneiras à chapa de base, garantindo o seu posicionamento (C1, C2 e C3, identificadas na Figura 4.2 e com explicação funcional na Tabela 4.3).

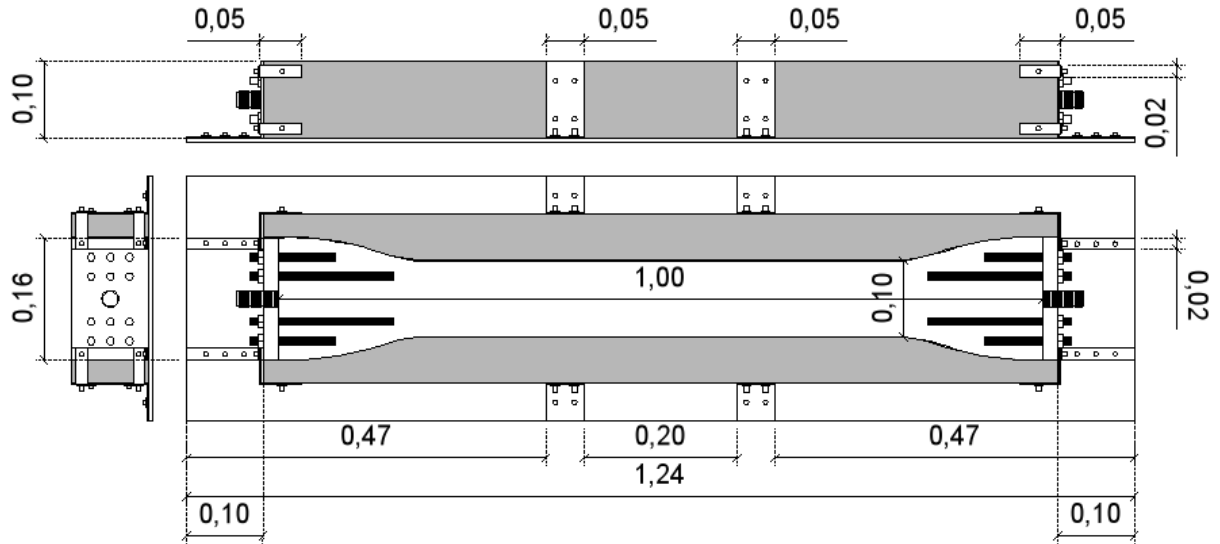


Figura 4.2- Molde utilizado para o provete VRF (m)

Tabela 4.3- Características das cantoneiras

Cantoneira	Ligação	Objetivo
C1	Base – Chapa de topo	Posicionamento da chapa de topo garantindo o paralelismo entre as duas extremidades
C2	Base – Parede do molde	Posicionamento das paredes do molde garantindo o paralelismo entre as superfícies laterais
C3	Chapa de topo – Parede do molde	Reforço da ligação entre a chapa de topo e parede do molde, garantindo que inexistência de perdas de betão nestas juntas

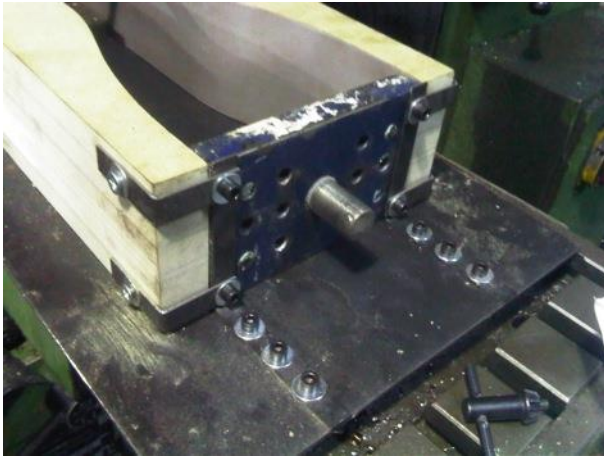


Figura 4.3-(a) Pormenor da ligação da chapa de topo à chapa de base; (b) molde do provete VRF em fase de construção

A observação da fotografia de um provete realizado com o novo molde, representada na Figura 4.4, permite comprovar o adequado desempenho do mesmo em relação à correta geometria do provete. Além da adequada betonagem dos troços de compatibilização junto às extremidades, observa-se um bom acabamento das superfícies cofradas. É de salientar que a remoção e limpeza do molde foram processos de fácil execução.



Figura 4.4- Provete resultante da utilização do novo molde

4.1.2 Atuador Hidráulico

Na Figura 4.5 está representado o cilindro hidráulico já utilizado como atuador no contexto da versão inicial do *VRF* desenvolvido por De Sousa (2011). Este sistema hidráulico é constituído por uma bomba hidráulica, um dispositivo de controlo do sentido do escoamento (depende do esforço que se pretende produzir, compressão ou tração), duas manguейras, uma válvula de retenção, uma válvula de controlo de caudal, uma câmara de azoto, um cilindro e um êmbolo.

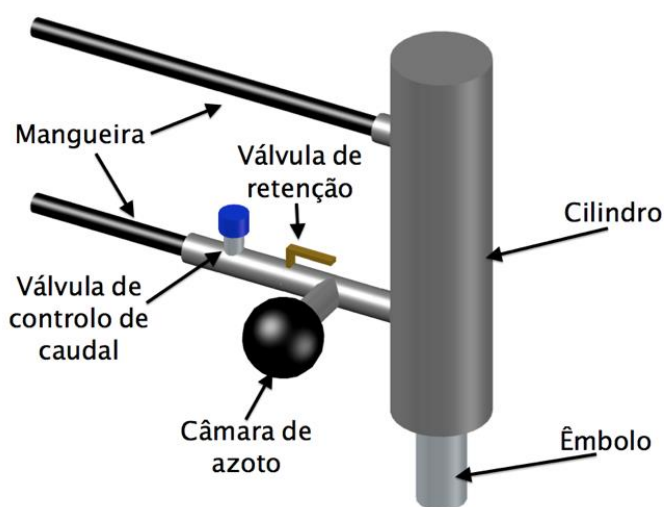


Figura 4.5- Representação do cilindro hidráulico utilizado no VRF

Tendo em conta as modificações reportadas em De Sousa (2013), que o próprio executou, referentes ao circuito hidráulico, foi decidido conduzir um ensaio piloto, para a verificação dos problemas constatados em De Sousa (2011). Inicialmente, pretender-se-ia realizar um ensaio de aplicação de carga para diversos patamares. O sistema de ensaio envolveu a utilização do atuador em causa, uma célula de carga, um provete de ensaio (da composição A, com idade superior aos 28 dias, ou seja, as previsões remetiam para inexistências de variações volumétricas desenvolvidas pela retração), conforme representado na Figura 4.6. Iniciado o ensaio, assistiu-se a perdas de carga bastante acentuadas, instantes após serem atingidos os respetivos patamares, pela observação do comportamento da célula de carga num computador, em tempo real. Estas perdas eram bastante mais intensificadas do que as observadas na Figura 2.18 (resultado do ensaio de fluência à tração realizado por De Sousa (2011), cujas perdas obrigavam à reposição do cilindro hidráulico em intervalos de um dia, aproximadamente), na medida em que a carga diminuía bruscamente passados poucos minutos.



Figura 4.6- Aparato sistema de ensaio previamente concebido para a condução de ensaio piloto

Resultante deste efeito, todo o sistema hidráulico foi observado detalhadamente, a fim de descobrir a origem das perdas. Para isso, foi necessária uma análise cuidada funcional do sistema que se sistematiza na Tabela 4.4.

Tabela 4.4- Dispositivos a estudar e suas respectivas funções

Dispositivo	Função
Mangueiras	Condução do fluido desde a bomba hidráulica até ao cilindro hidráulico
Válvula de controlo de caudal	Controlo do caudal na passagem entre a bomba hidráulica e o cilindro hidráulico
Válvula de retenção	Controlo do escoamento na passagem entre a bomba hidráulica e o cilindro hidráulico
Câmara de azoto	Absorção dos choques hidráulicos e compensação das perdas de pressão existentes no interior do cilindro

Por forma a compreender os problemas de desempenho do sistema atuador, foram realizados diferentes testes a alguns dispositivos. Sendo assim, foram apontados diferentes pontos onde

o sistema hidráulico teria maior probabilidade de estar a dissipar óleo. Admitiu-se a possibilidade do cilindro poder estar a perder fluido: na zona inferior do êmbolo (ver P1 na Figura 4.7); pela zona da válvula de retenção (P2 da Figura 4.7); pela passagem de fluido da parte inferior do cilindro para a parte superior (P3 da Figura 4.7), relacionado com os vedantes que existem na interface entre o cilindro e o êmbolo; e devido à câmara de azoto (P4 da Figura 4.7).

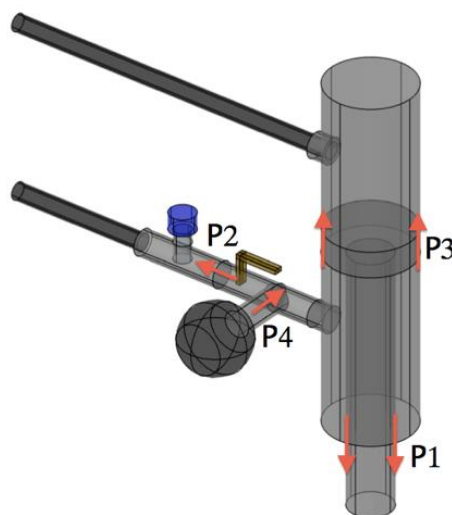


Figura 4.7- Zonas de possíveis perdas de óleo

De forma a investigar os possíveis problemas exemplificados na Figura 4.7 foram conduzidos diferentes ensaios de curta duração, no mesmo provete que inicialmente seria ensaiado, utilizando o sistema da Figura 4.6. Durante o ensaio o provete foi carregado até uma carga de aproximadamente $10kN$, tendo este esforço sido imposto através de pressões relativamente baixas, atendendo à autonomia para que o cilindro foi dimensionado e garantindo, consequentemente, a segurança de todo o sistema. Simultaneamente, foi controlada a perda de carga existente, através da observação dos resultados adquiridos por um computador e examinada a perda de óleo nos determinados pontos em análise:

- Injeção de fluido pela mangueira inferior, ou seja, aplicando esforços de tração ao provete e, posteriormente, com a válvula de retenção fechada (P2 da Figura 4.7), tal como exemplificado na Figura 4.8, que se encontra entre a bomba hidráulica e o atuador, foi aberta a válvula de controlo de caudal com o intuito de examinar se existiam perdas por esta zona. Desta forma, como não foi observado perda de óleo

neste ponto, foi possível descartar a possibilidade da válvula de retenção estar a dissipar óleo em fase de carregamento.

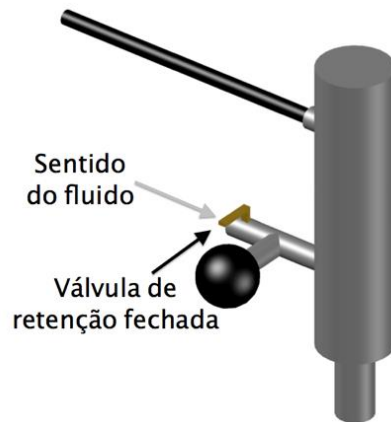


Figura 4.8- Representação do teste executado à válvula de retenção

- Injeção de fluido pela mangueira inferior, aplicando esforços de tração para determinada carga e com o auxílio da célula de carga observou-se a perda de carga no tempo, existente nos casos de utilização de câmara de azoto e sem câmara de azoto (P4 da Figura 4.7). Considerou-se que a câmara de azoto, por ter a finalidade de amortecer os choques hidráulicos, pudesse estar na origem das diferenças de carga. Contudo, as perdas foram praticamente iguais quer a câmara de azoto fosse ou não utilizada. Como tal, concluiu-se que o problema não seria relacionado com a câmara de azoto, apresentado na Figura 4.9.

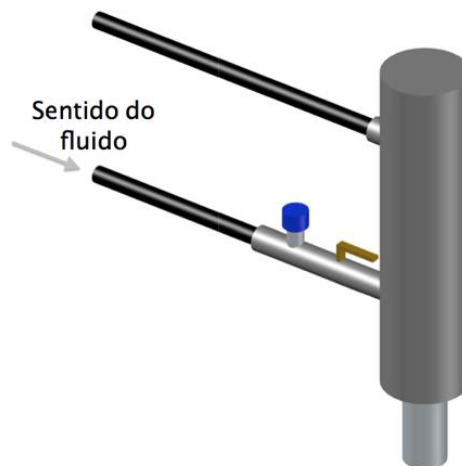


Figura 4.9- Representação do teste executado à câmara de azoto

- Injeção de fluido pelo orifício inferior, aplicando esforços de tração para determinada carga e, seguidamente, retirar a mangueira do orifício superior, que exerce os esforços de compressão, de forma a observar se escapava óleo neste local, tal como representado na Figura 4.10. Reparou-se que, para cargas superiores aos $7kN$, ocorriam pequenas perdas de óleo no orifício superior (P3 da Figura 4.7), suscitando dúvidas acerca do desempenho dos vedantes, que se encontram na interface entre o êmbolo e as paredes interiores do cilindro. Por outras palavras, isto significa que quando eram exercidos esforços de tração, uma parte do óleo na zona inferior ao êmbolo migrava para a zona superior e, como consequência, diminuía a pressão exercida no êmbolo, causando o decréscimo da carga aplicada.

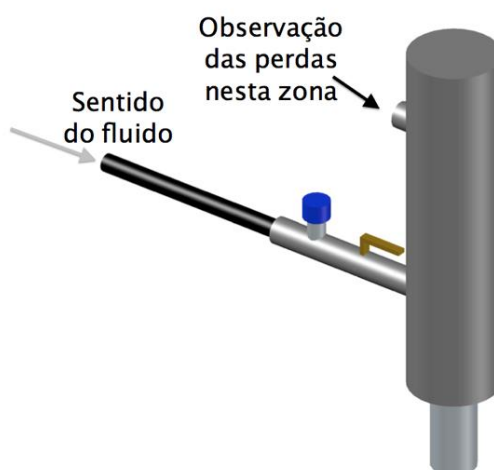


Figura 4.10- Representação do teste executado aos vedantes existentes na interface entre o cilindro e êmbolo

Durante todos os testes executados, observou-se ao mesmo tempo que não existiram perdas na zona (P1 da Figura 4.7), como tal, foi descartada a possibilidade de existir alguma deficiência na vedação do cilindro na zona onde desliza a haste do êmbolo para o exterior/interior.

Adicionalmente, poder-se-ia, ainda, ter executado um ensaio adicional aos vedantes na interface cilindro/êmbolo, instrumentando uma válvula de retenção entre a mangueira e o orifício superior de forma a sustentar totalmente a perda de óleo nesta zona. O provete seria carregado novamente e observar-se-ia, ao mesmo tempo, o surgimento de perdas de carga através dos dados fornecidos por um computador, tal como se encontra representado na Figura 4.11. Este teste seria o ponto final na avaliação do comportamento dos vedantes, pois

no único ensaio executado para apreciação do desempenho dos mesmos, é habitual existirem perdas de óleo no orifício superior, dado que, quando o orifício se encontra sujeito à pressão atmosférica, pode conduzir à libertação de parte do fluido existente nesta zona. Contudo, por questões de tempo e como o ensaio envolveria a aquisição de uma válvula de retenção adicional, não se reuniram as condições para a condução do mesmo.

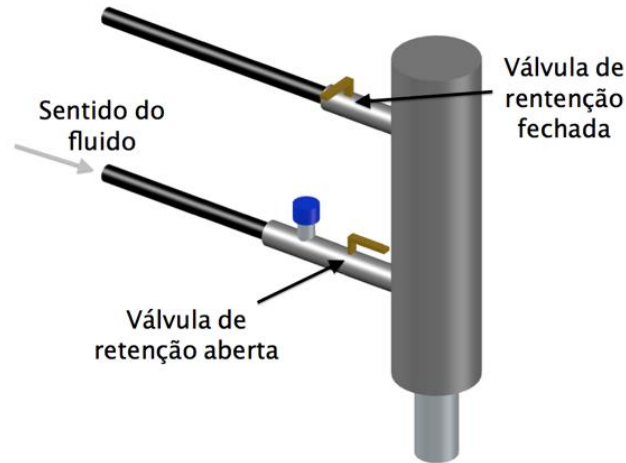


Figura 4.11- Representação do teste adicional aos vedantes existentes na interface entre o cilindro e o êmbolo

Considerando os vedantes a possível causa da diminuição da carga, o cilindro hidráulico foi enviado para retificação, tendo sido confirmado pela empresa reparadora que o vedante interior estava de facto danificado. Com o cilindro retificado, foi possível realizar um ensaio para a validação da sua capacidade de manutenção de carga a níveis constantes, utilizando mais uma vez o sistema de ensaio representado na Figura 4.6. O ensaio teve apenas o objetivo de observar as perdas de carga, que eram praticamente instantâneas no ensaio reportado anteriormente, através da análise dos resultados mencionados pela célula de carga. Como tal, o ensaio teve a duração de 40 minutos, considerando-se que este intervalo de tempo seria suficiente para avaliar o problema que anteriormente se tinha verificado, partindo do princípio que o cilindro teria um bom comportamento quando sujeito a cargas constantes num ensaio de longo prazo. A Figura 4.12 pretende representar o comportamento do cilindro hidráulico, após ter sido efetuada a retificação no ensaio descrito. Durante o patamar de carga mais alta, 10kN, constatou-se que houve uma variação de, aproximadamente, 1,8% sobre a carga total aplicada, tratando-se de um valor suficientemente reduzido. Adicionalmente, seria ainda necessário conduzir um ensaio com uma duração superior à anterior, para constatação do comportamento

do cilindro sob carga constante. Contudo, não houve oportunidade de realizar o mesmo e, como foi referido anteriormente, considerou-se não haver necessidade, visto que o cilindro tinha sido recentemente reparado. Sendo assim, com a retificação do cilindro e substituição da bomba hidráulica e mangueiras, considera-se que foram atingidas as condições para a condução de ensaios de restrição à deformação e de fluência à tração, com o mínimo de intervenções ao longo do tempo.

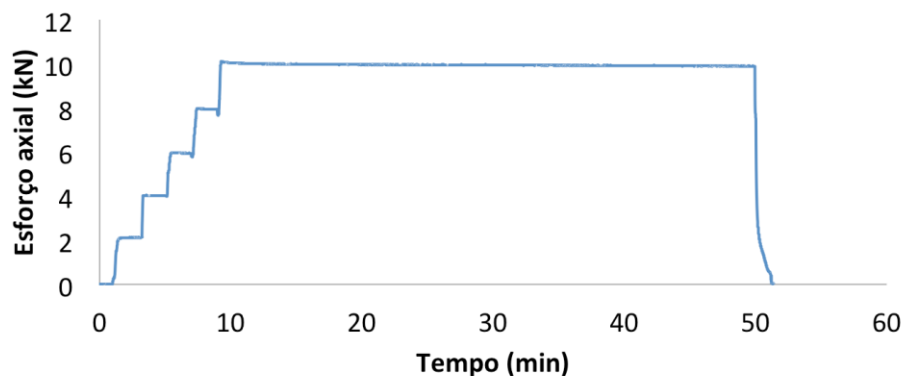


Figura 4.12- Gráfico representativo do comportamento do cilindro hidráulico, após retificação, sujeito a carga constante

4.1.3 Sistema de medição de deformações

A medição das deformações ocasionadas em ensaios pode assumir diferentes configurações, todavia, os métodos mais utilizados são sistemas embebidos ou por fixação exterior. Os sistemas de medição embebidos desenvolvem-se desde o interior dos provetes, posicionando-se no molde antes de se efetuar a betonagem. Vários investigadores que têm vindo a estudar estruturas sujeitas à restrição ativa desenvolveram sistemas deste tipo, entre os quais Altoubat e Lange (2001) e Sule e Breugel (2001), através da utilização de LVDTs. Por outro lado, os sistemas de fixação exterior são, naturalmente, constituídos por engenhos que se dispõem nas superfícies dos provetes, tal como utilizado em De Sousa (2011). Estes têm a possibilidade de apenas serem posicionados no instante em que se pretende iniciar os ensaios.

Altoubat e Lange (2002) estudaram a influência das medições serem realizadas ao nível do comprimento total do provete e, apenas, na zona de seção transversal constante, ou seja, comparou os resultados obtidos entre as medições realizadas num comprimento que dista as

duas garras metálicas, que ancoram as extremidades dos provetes, e as medições executadas num comprimento inferior ao da zona de secção corrente. Neste estudo, ficou provado que as medições realizadas na zona corrente apresentam resultados de maior precisão, na medida em que, na zona das garras metálicas, se dá a transferência de esforços. Os autores afirmam que a contabilização das medições no comprimento total gera um excesso de deformação resultante da zona de ancoragem, em que a secção é superior à zona corrente, quer ao nível da deformação elástica quer ao nível da fluência, resultando em medições erráticas, visto que a medição é referente ao somatório dos deslocamentos de duas zonas cujas secções são diferentes. Adicionalmente, Altoubat e Lange (2002) afirmam que podem ocorrer deslizamentos na interface provete/garra.

As medições realizadas, utilizando um sistema de medição embebido no provete, podem dar origem à fragilização da zona em que é posicionado o dispositivo, causando eventualmente a rotura do mesmo, o que se traduz numa desvantagem, quando se pretende o estudo da suscetibilidade à fissuração e sua propagação (sendo que este sistema será igualmente utilizado na versão do *VRF* preparado para betão armado).

No Capítulo 2 foram reportados alguns aspetos que não foram totalmente validados no sistema de medição desenvolvido por De Sousa (2011). Considerou-se que o comportamento dos materiais utilizados para a colagem, betume poliéster e cola quente podiam estar na origem de inconsistências nas medições. O betume poliéster é um material cujo emprego é utilizado na regularização de elementos laminares resultante da sua capacidade de aderência a superfícies lisas. A utilização deste material requer a junção com um catalisador para que o endurecimento seja acelerado, tendo uma duração aproximada de cinco minutos. A cola quente é formada por um adesivo termoplástico, armazenada no interior de uma pistola que aquece a mesma. Sempre que premido o gatilho, da pistola, a cola é libertada, adquirindo, nesse instante, um aspeto viscoso, mas, quando sujeita à temperatura ambiente, tende a solidificar. Por um lado, a aderência deste material às superfícies demora cerca de 30 segundos, aproximadamente, por outro, a cura total da cola tem uma duração de, sensivelmente, 24 horas. As informações anteriores foram recolhidas dos catálogos técnicos referentes aos respetivos materiais. De forma a perceber qual a influência destes materiais e quais as deformações que implicam, propôs-se a realização de diferentes testes. As experiências abrangeriam a condução de uma série de ensaios estáticos, medindo as respetivas deformações, resultantes da colagem dos diversos componentes que englobam o sistema de ensaio, recorrendo aos materiais referidos. As experiências conduzidas tinham a

particularidade de terem sido realizadas unicamente em ambientes de temperatura e humidade controlada ($T = 20^{\circ}\text{C}$ e $H_r = 60\%$), garantindo que estas variáveis não implicariam alterações volumétricas desta natureza nos materiais utilizados na colagem. Pretendeu-se que os deslocamentos registados fossem nulos e qualquer deformação observada seria interpretada como sendo originada pelos materiais utilizados.

▪ Ensaio conduzido sobre uma base em chapa

Foram conduzidos dois ensaios semelhantes, para a obtenção de dados com maior consistência. O sistema de ensaio envolvido, englobou a colagem de duas braçadeiras, onde foram posicionados/apertados dois LVDTs, e duas cantoneiras, funcionando como batentes, a uma chapa metálica de base, exemplificadas na Figura 4.13, isto é, uma braçadeira e uma cantoneira coladas com cola quente e as outras com betume poliéster. O objetivo da experiência foi observar o comportamento, em simultâneo, dos dois materiais. Cada ensaio difere apenas na ordem com que as colagens foram efetuadas, ou seja, no primeiro utilizou-se a cola quente em primeiro lugar e depois o betume poliéster, no segundo, o pela ordem contrária.

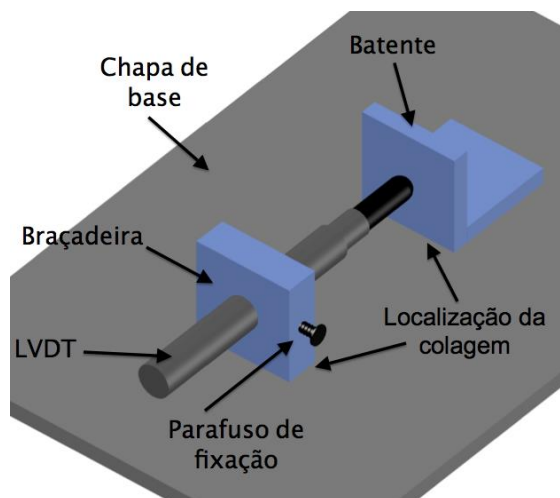


Figura 4.13- Representação do sistema de ensaio utilizando cola quente/betume poliéster

A colagem dos dispositivos, quer com o betume poliéster, quer com a cola quente, foram realizadas o mais depressa possível para tentar perceber qual o comportamento destes materiais no intervalo compreendido entre a colocação e o instante em que é atingida a cura total. Os ensaios iniciaram-se quando todas as colagens foram concluídas. Os resultados dos ensaios, apresentados na Figura 4.14 e Figura 4.15, foram obtidos através da utilização de um

sistema de aquisição que regista as medições executadas pelos LVDTs. Com base nos resultados apresentados, considera-se que o declive de cada curva pode representar dois comportamentos: declive negativo significa que a cantoneira e a braçadeira, respetivas a um dado material, se estão a aproximar; declive positivo expressa a afastamento da cantoneira e a braçadeira respetiva.

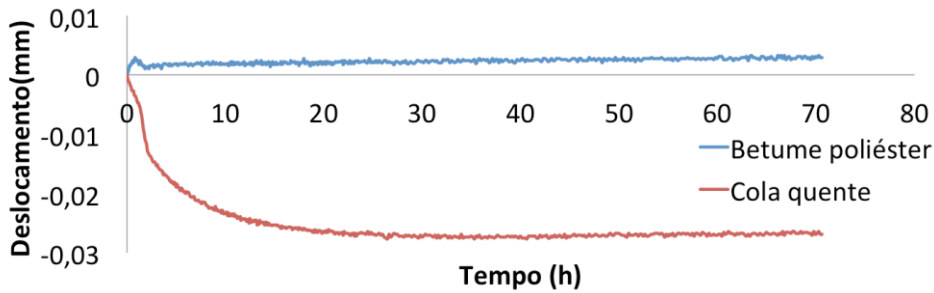


Figura 4.14- Deslocamentos sofridos pelo betume poliéster e cola quente, Ensaio 1

O betume poliéster obteve deslocamentos claramente inferiores aos da cola quente. As variações de deslocamento do betume poliéster e da cola quente foram de $3,265\mu\text{m}$ e $27,674\mu\text{m}$, respetivamente, como tal, o deslocamento da cola foi 8,5 vezes superior ao do primeiro e de sinal oposto ao deslocamento do primeiro. Com base no gráfico da Figura 4.14, é possível observar que o deslocamento da cola quente só uniformiza a partir das 27 horas e 46 minutos após a sua fixação, sendo que o tempo de cura total se aproxima da duração citada anteriormente.

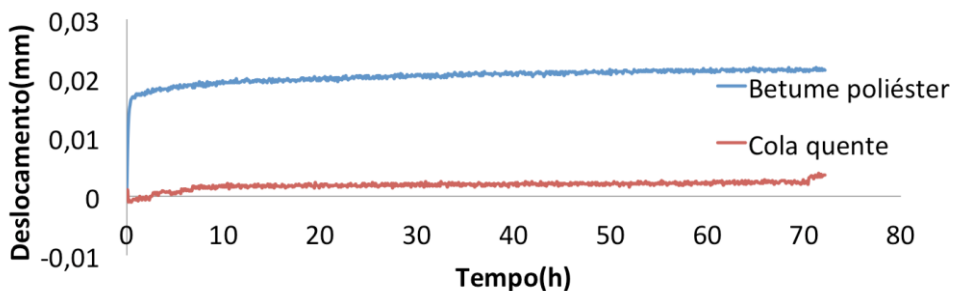


Figura 4.15- Deslocamentos sofridos pelo betume poliéster e cola quente, Ensaio 2

Através da Figura 4.15 é possível observar um grande deslizamento do betume poliéster no início do ensaio. Este resultado prolongou-se desde o instante inicial até aos 19 min,

sensivelmente, considerando-se que este efeito esteve relacionado com o tempo de cura do mesmo. Comparando os resultados previstos, de acordo com a informação retirada dos catálogos, com os resultados obtidos verifica-se alguma diferença na duração do endurecimento do mesmo. Contudo, considera-se que esta diferença não é de tal ordem elevada que conduza ao abandono da justificação inicial, além disto, o tempo de cura observado pode, coincidentemente, ter resultado da quantidade de catalisador adicionado ao betume poliéster. Quanto à cola quente verifica-se que desta vez o sentido do deslocamento é contrário ao observado no gráfico da Figura 4.14 e que o tempo que leva ao endurecimento total da mesma é substancialmente inferior, sendo desta vez teve uma duração de aproximadamente 10 horas. Desprezando-se os deslocamentos obtidos para os instantes anteriores aos 19min, constata-se que a variação experimentada pelo betume foi de $6,359\mu m$ enquanto a cola variou $4,847\mu m$.

Os deslocamentos resultantes do comportamento da cola são de difícil compreensão. Contudo, o facto de ao longo do seu tempo de cura, esta retrair, considera-se que se aplicação de uma espessura superior num dos lados da cantoneira ou batente possa ter levado aos deslocamentos obtidos. Este deslocamento encontra-se representado na Figura 4.16



Figura 4.16- Deslocamento provocado pela retração da cola quente

- **Ensaio realizado sobre um provete de betão endurecido**

A configuração do sistema utilizado neste ensaio, representado na Figura 4.17, difere do sistema anterior, esquematizado na Figura 4.13, na medida em que foi substituída a chapa metálica de base por uma amostra de betão, de forma a retirar conclusões acerca da aderência da cola quente e do betume poliéster no betão. A amostra de betão utilizada esteve durante

vários meses submetida à secagem, como tal, o risco relacionado com a ocorrência de deformações por retração durante este procedimento experimental pôde ser descartado. Adicionalmente, tendo em conta que o ensaio decorreu num ambiente de temperatura e humidade constantes, o provete não poderia vir a sofrer alterações volumétricas devido a estes efeitos. Durante o ensaio, em que o resultado se encontra representado na Figura 4.18, foram registadas a temperatura e humidade relativa, que variaram em $20,8^{\circ}\text{C} \pm 0,2$ e $61,7\% \pm 2,9$, respetivamente.



Figura 4.17- Aparato do ensaio realizado com base em betão

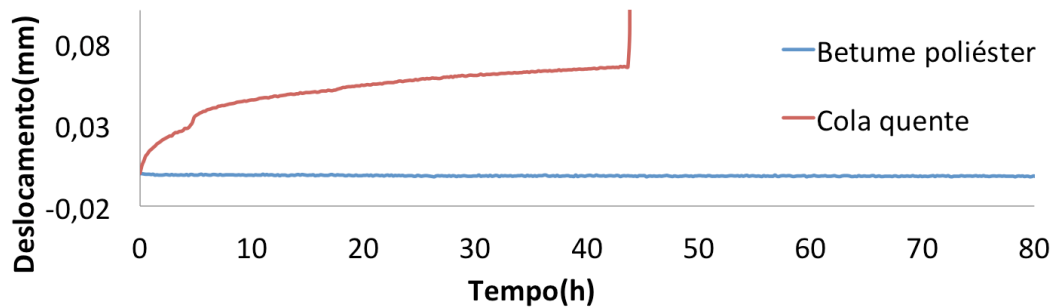


Figura 4.18- Deslocamentos registados por cada um dos LVDTs mostrados na Figura 4.17

Pela observação do gráfico representado na Figura 4.18, é possível constatar que a fixação do LVDT, fixado com a cola quente, falhou após 44 horas o ensaio ter iniciado. Por um lado, este erro pode ter sido provocado por uma simples pancada (apesar da base ser em betão, proporcionando maior atrito comparativamente ao aço) ou mesmo pela fraca capacidade resistente de arrancamento na ligação proporcionada pela cola quente. Por outro lado, através

do betume poliéster, conseguem-se obter resultados mais satisfatórios, quando se utiliza o bloco de betão, o que seria de esperar tendo em conta o acabamento rugoso das superfícies, em relação ao da chapa metálica utilizada no ensaio 1 e 2. Desta vez, a variação de deslocamento foi reduzida para os $2,235\mu m$, comparativamente ao melhor valor obtido, $3,265\mu m$, para o caso em que é utilizado o aço como base, onde os dispositivos são colados.

Tabela 4.5- Resultados obtidos nos ensaios estáticos

Ensaio	Ambiente	Fixação	Δ Cola Quente (μm)	Δ Betume Poliéster (μm)
1	Controlado	Aço	27,674	3,265
2	Controlado	Aço	4,847	6,359
3	Controlado	Betão	Falhou	2,235

Observando os resultados obtidos na Tabela 4.5, é possível concluir que estes materiais, embora de fácil aplicação e apesar de acarretarem custos reduzidos, apresentam elevadas variações de deslocamentos ao longo do tempo, maioritariamente relacionados com a duração da cura dos mesmos. A cola quente em particular apresenta uma resistência ao arranque bastante limitada, consecutivamente, as peças em que esta foi utilizada são substancialmente mais fáceis de extrair do que as coladas com o betume poliéster. Além das irregularidades enunciadas, é ainda difícil a previsão de quais os deslocamentos que ocorrerão ao longo da sua utilização. Concluindo, considera-se que a utilização destes materiais em ensaios do contexto desta dissertação, possam comprometer os resultados obtidos, na medida em que se pretende a medição de deformações na ordem do micrómetro.

Com o objetivo de prevenir a ocorrência de medições erráticas, consequência da utilização dos materiais citados na colagem dos sistemas de medição, foi criado um novo sistema de fixação de LVDTs, inspirado no utilizado nos ensaios de módulo de elasticidade em cilindros apresentado por Boulay et al. (2013). Observando a Figura 4.19, deduz-se que o novo sistema de fixação é composto por dois anéis que são fixos ao provete através do aperto de oito parafusos. O anel superior tem quatro extensores encastrados no seu interior que se desenvolvem até ao anel inferior, funcionando como batentes para os LVDTs. Os últimos encontram-se ancorados ao anel inferior através de quatro peças de suporte. Os extensores são

inseridos em guias que fazem parte do anel inferior, de forma a impossibilitar translações excessivas e falhas nas medições. As mesmas possuem um entalhe para facilitar a observação do posicionamento do LVDT, em contacto com o respetivo extensor, por parte do operador, conforme representado na Figura 4.20. A variação de deslocamento sofrida pelo provete conduz ao afastamento ou à aproximação dos dois anéis, e consequentemente, do curso dos LVDTs. O sistema real pode ser observado na Figura 4.21.

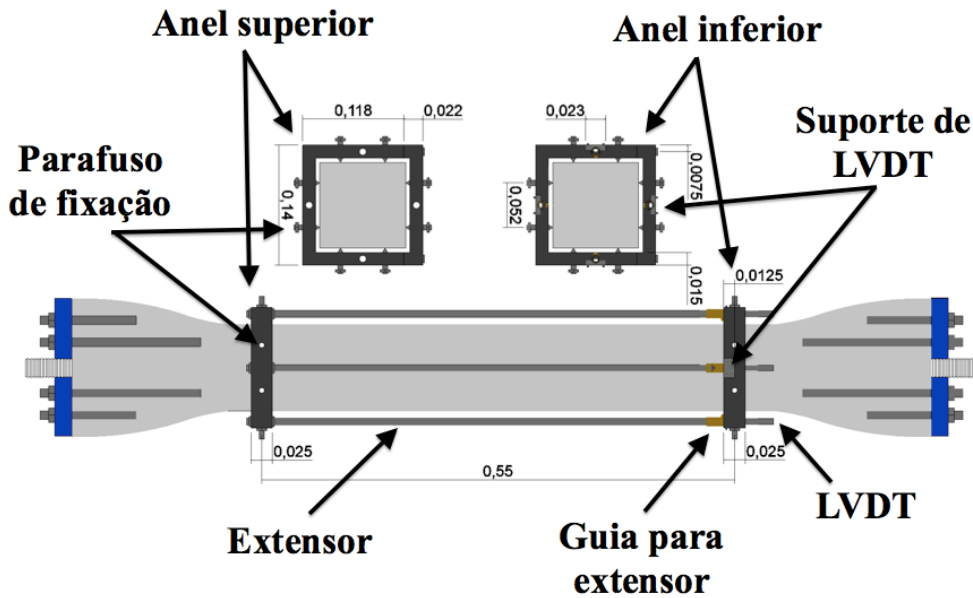


Figura 4.19- Representação cotada do sistema de fixação para LVDTs (m)

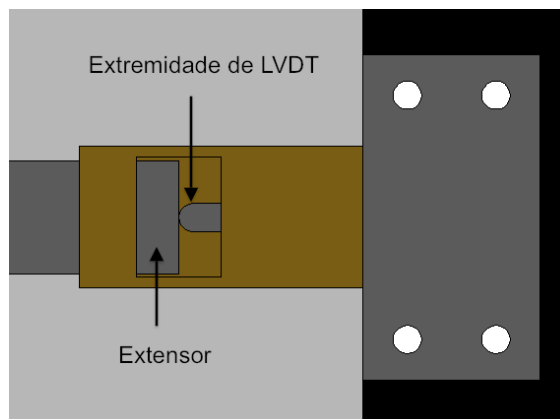


Figura 4.20- Pormenor da guia concebida para ligação de extensor a LVDT



Figura 4.21- Pormenor da fixação dos LVDTs e sistema de fixação total

Seguidamente, foram realizados testes para a validação do sistema de fixação para LVDTs. O sistema de ensaio utilizado para a condução deste ensaio foi o mesmo que apresentado anteriormente na Figura 4.6. O provete, também utilizado anteriormente, da composição A, apresentava nesta data uma idade de 39 dias, suficiente para que já não ocorressem deformações por retração durante o período de testes, tal como anteriormente assumido. O provete foi sujeito a três ciclos de carga e descarga entre os $2kN$ e os $10kN$, num local sem controlo de temperatura e humidade relativa. Apesar do ensaio decorrer neste ambiente, considerou-se que não existiria interferência dada a reduzida duração do mesmo (da ordem dos 20 minutos). Os deslocamentos e cargas obtidas dos ensaios estão representados nos gráficos da Figura 4.23 e Figura 4.24, respetivamente. O comportamento dos LVDTs utilizados no ensaio, cujos resultados se encontram na Figura 4.23, estão respetivamente identificados na Figura 4.22.

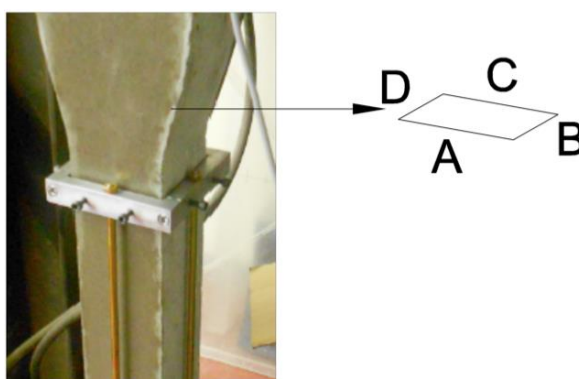


Figura 4.22- Legenda das faces do provete

Com base na Figura 4.22 e no gráfico da Figura 4.23 conclui-se que a o LVDT Frente corresponde aos deslocamentos medidos na Face A, sendo que esta corresponde à face inferior da betonagem.

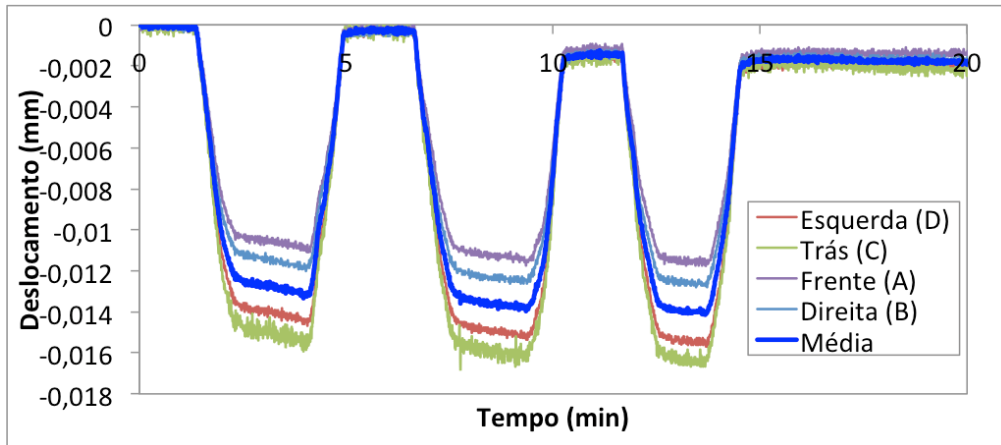


Figura 4.23- Gráfico de deslocamentos

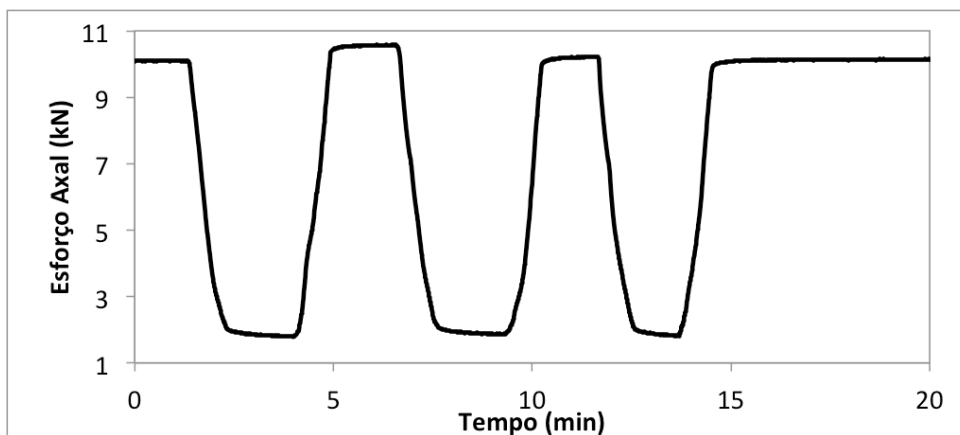


Figura 4.24- Gráfico da carga aplicada

Analisando o gráfico da Figura 4.23, que diz respeito aos deslocamentos, e à esquematização das faces dos provetes na Figura 4.22, repara-se que a maior deformação ocorre no LVDT da face C e a menor no LVDT da face A. Este resultado pode dever-se ao facto de a betonagem ser executada na horizontal, conduzindo a alguma segregação e piores propriedades na face superior (Face C).

Comparando os resultados dos ensaios estáticos com os deslocamentos obtidos no ensaio anterior para uma carga de 7kN é possível reparar que, apesar de não originarem sempre as mesmas deformações ao longo dos 3 ciclos de carga/descarga, a variação de deslocamento

máxima é de $1,46\mu m$, exemplificados na Tabela 4.6, comparativamente ao melhor resultado adquirido nos ensaios estáticos, $2,23\mu m$. Portanto, tendo em conta que o limite de deformação utilizado para o ensaio de retração impedida é de $10\mu m$ e admitindo que existe uma margem de erro na ordem dos $1,5\mu m$, verifica-se um melhoramento substancial nos resultados. Assim, este novo sistema, além de ser reutilizável, não necessita de extração das colas das paredes dos provetes, cujo processo envolve a utilização de ferramentas, levando à fragilização das mesmas. Adicionalmente, trata-se de um sistema limpo, ou seja, a sua utilização gera medições de maior precisão, eliminando as deformações adicionais relacionadas com o tempo de cura da cola quente e do betume poliéster, tanto como o ambiente em que se localizam.

Tabela 4.6- Representação dos deslocamentos medidos para uma carga de 7kN

Ciclo	Plano	ZD (μm)	ZB (μm)	ZA (μm)	ZC (μm)
1	Carga	-5,034	-4,208	-3,979	-5,544
	Descarga	-6,295	-5,118	-4,764	-6,446
2	Carga	-6,043	-4,992	-4,393	-6,277
	Descarga	-7,024	-5,834	-5,323	-7,275
3	Carga	-6,698	-5,684	-4,914	-7,198
	Descarga	-7,372	-5,785	-5,442	-7,659
Valor Médio		-6,496	-5,401	-4,839	-6,822
Variação	Superior	1,462	1,193	0,859	1,278
Variação	Inferior	0,875	0,433	0,603	0,837

Observando a Tabela 4.6 é possível provar ainda a veracidade da seguinte expressão:

$$\delta_{Trás(C)} > \delta_{Esquerda(D)} > \delta_{Direita(B)} > \delta_{Frente(A)}$$

De forma a provar a coerência dos deslocamentos obtidos foram desenhados dois planos resultantes da Tabela 4.6. A construção dos planos representados na Figura 4.26 seguiram o princípio exemplificado na Figura 4.25. Admitindo que só se conhece as coordenadas Z_1 , Z_2 e Z_3 podem ser desenhadas duas retas, sendo estas r_1 e r_2 . Para a formação do plano a seguinte condição terá que ser satisfeita:

$$r_1 \parallel r_3 \text{ e } r_2 \parallel r_4$$

Sendo assim, depois da construção das retas r_1 e r_2 , são coladas duas retas fictícias “ r_1 ” e “ r_2 ” nos pontos P_3 e P_1 respetivamente, dando origem a duas novas retas r_3 e r_4 . A interseção das duas retas r_3 e r_4 dão origem ao ponto P_4 . Obtendo a cota Z_4 pode comparar-se com a cota dada pela Tabela 4.6.

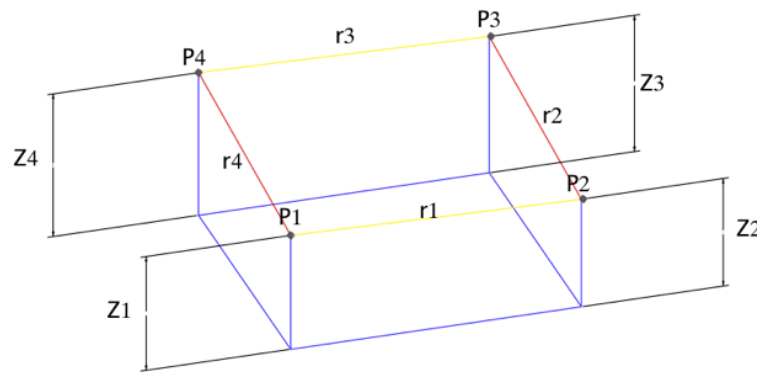


Figura 4.25- Exemplo de plano genérico

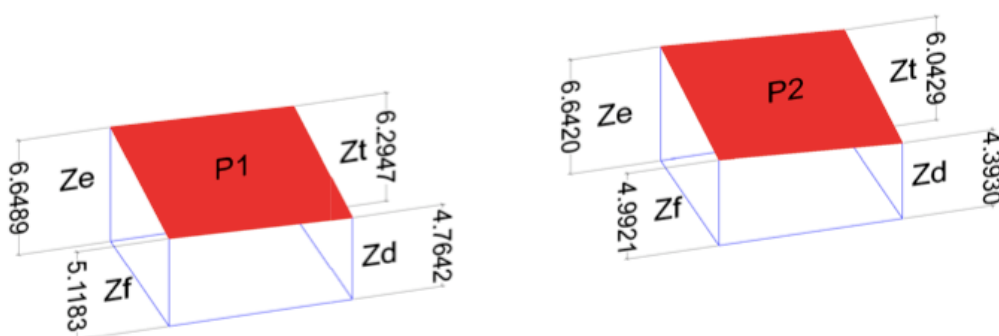


Figura 4.26- (a) Plano resultante da descarga do 1ºCiclo da Tabela 4.6 [μm]; (b) Plano resultante do carregamento do 2ºCiclo da Tabela 4.6 [μm]

Comparando a Tabela 4.6 com a Figura 4.26, ou seja, comparando Z_e (cota da face esquerda) medido pelo LVDT e Z_e resultante da construção de um plano, é possível concluir que as cotas são relativamente diferentes, pela observação da Tabela 4.7. Mesmo assim, esta diferença não ultrapassou os $0,365\mu\text{m}$ e, como tal, pode ser referente ao facto da betonagem ser executada na horizontal, conduzindo a uma maior rigidez na zona inferior e diminuindo ao longo da altura desta, resultando num aumento da deformação à medida que se afasta da superfície inferior, como já esclarecido acima. Adicionalmente, pode ainda ter ocorrido algum escorregamento no aperto existente entre o sistema de fixação e o provete, ou mesmo alguma excentricidade no processo de carregamento.

Considera-se desta forma que o desempenho do novo sistema de medição foi bastante satisfatório, apesar de ocorrerem alguns erros, cujas dimensões são suficientemente pequenos e, como tal, permitem ser desprezados.

Tabela 4.7- Representação das cotas da face esquerda

Plano	Z_e real (μm)	Z_e desenhado (μm)
2	6,446	6,649
3	6,277	6,642

4.2 Sistema variante para ensaio de provetes armados

No âmbito desta dissertação pretende-se a criação de um sistema de ensaio análogo ao *VRF* desenvolvido por De Sousa (2011), apresentado na Figura 2.23, que possibilite, da mesma forma, a condução de ensaios de retração restringida ativa, mas com a particularidade de acarretar custos inferiores, permitindo a implementação e utilização dos dois ou mais sistemas em paralelo. Este novo sistema resultará de algumas modificações do citado, quer ao nível do atuador utilizado, quer do sistema de medição de deformações.

4.2.1 Atuador

Este capítulo diz respeito à definição de uma forma alternativa de aplicação da carga/deformação, substituindo todo o sistema hidráulico envolvido no *VRF*, e permitindo a

aplicação de carga manualmente por um operador e a possibilidade da substituição da célula de carga, por um sistema que possibilite conhecer a carga em qualquer instante de tempo, através da observação das deformações do mesmo. Várias opções foram analisadas no Capítulo 3, entre as quais, sistemas hidráulicos, sistemas com molas de compressão, sistemas de engrenagens e sistemas de aperto manual. O sistema de aperto manual, por ser o dispositivo que menores custos envolve e por permitir atingir esforços na ordem dos $50kN$, será analisado aprofundadamente para a compreensão do seu desempenho em termos de capacidade de sustentar cargas constantes, em ensaios de médio/longo prazo, e a possibilidade de aplicação de esforços reduzidos.

Este novo sistema pretende conduzir, em parceria com um programa de doutoramento em curso, diferentes ensaios em provetes de betão armado com armaduras convencionais e fibras discretas, no qual serão utilizados varões $\phi 10$, $\phi 12$ e $\phi 16$. Para tal, com o sistema de aperto pretende-se-ia efetuar a maquinação das pontas dos varões que seriam ancoradas a um pórtico através do uso de porcas, como exemplificado na Figura 4.27.



Figura 4.27- Sistema de ensaio para ancoragem do varão ao pórtico pelo uso de porcas

Como um dos objetivos principais do ensaio é a possibilidade de continuar o mesmo até ser atingida a fendilhação estabilizada, sendo que a carga correspondente a este instante representa um acréscimo de, aproximadamente, 30% sobre a carga que dá origem à primeira fenda, a solução inicial, para a ancoragem dos varões, teve que ser repensada. As pontas, que após maquinação, se transformam em varões roscados tipo $M8$, $M10$, e $M14$, respetivamente,

perdem consideravelmente a sua secção transversal, resultando na minoração da carga última (à tração) correspondente a cada varão, conforme será demonstrado a seguir.

Admitindo um provete de betão armado, formado por um betão da classe C30/37, $f_{ctm} = 2,9MPa$ e $E_c = 33GPa$, o provete de $0,1 \times 0,1m^2$ e o módulo de elasticidade do aço $E_s = 200GPa$ a carga a que ocorre a primeira fenda e a carga correspondente à fendilhação estabilizada é dada por:

$$\sigma = \frac{N}{A} \Leftrightarrow N_{cr} = \sigma \times A_{hom} \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$A_{hom} = A_c + (\alpha - 1) \times A_s$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_c}$$

Com as expressões anteriores é possível prosseguir com o cálculo do esforço axial resistente dos varões nervurados:

$$N_{cr\phi 10} = 2,9 \times 10^3 \times \left(0,1 \times 0,1 + \left(\frac{200}{33} - 1 \right) \times \frac{0,01^2 \times \pi}{4} \right) = 30,15kN \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N_{cr\phi 10,est} = 39,19kN$$

$$N_{cr\phi 12} = 30,66kN \Rightarrow N_{cr\phi 12,est} = 39,86kN$$

$$N_{cr\phi 16} = 31,95kN \Rightarrow N_{cr\phi 16,est} = 41,54kN$$

Sendo que:

$$N_{cr\phi,est} = 1,3 \times N_{cr\phi} \quad \text{Eq. 4.3}$$

A resistência à tração de varões, maquinados nas extremidades, tipo M8, M10 e M14, para uma tensão máxima $f_{ub} = 500MPa$, são de:

$$F_{t,Rd} = f_{ub} \times A_s \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$F_{t,Rd,M8} = 500 \times 10^3 \times 6,78 \times 10^{-3} = 18,04kN$$

$$F_{t,Rd,M10} = 500 \times 10^3 \times 8,58 \times 10^{-3} = 28,94kN$$

$$F_{t,Rd,M14} = 500 \times 10^3 \times 12,10 \times 10^{-3} = 57,50kN$$

A Tabela 4.8 compara a carga que origina a fendilhação estabilizada e a resistência à tração dos respetivos varões maquinados, de forma a entender até que ponto os varões maquinados nas pontas serão uma opção viável para o sistema de ensaio.

Tabela 4.8- Comparação da carga referente à fendilhação estabilizada de um provete de betão armado e resistência à tração do respetivo varão maquinado

Fendilhação estabilizada de um provete de betão armado	Resistência à tração do varão maquinado	Verificação: $F_{t,Rd} > N_{cr,est}$, OK!
$N_{cr\phi 10,est} = 39,19kN$	$F_{t,Rd,M8} = 18,04kN$	KO!
$N_{cr\phi 12,est} = 39,86kN$	$F_{t,Rd,M10} = 28,94kN$	KO!
$N_{cr\phi 16,est} = 41,54kN$	$F_{t,Rd,M14} = 57,50kN$	OK!

Da Tabela 4.8 conclui-se que apenas o ultimo caso é verificado. Para garantir o mesmo processo para todos os varões, ou seja, utilizando um sistema global que possa ser utilizado seja qual for o varão a ensaiar, é necessário proceder a alteração da ancoragem das extremidades do provete. Para tal foi proposta a utilização de cunhas de pré-esforço, representadas na Figura 4.28, responsáveis por suster o posicionamento das pontas dos varões. A cunha passiva, Figura 4.28a) teria como objetivo a ancoragem do provete na extremidade inferior e a utilização de um acoplador, Figura 4.28b), formado por duas cunhas interiores, ligaria a extremidade superior do varão, do provete de betão armado, a um varão M16 da classe 8.8. O aperto (momento torsor) seria aplicado no varão M16, por usufruir de maior capacidade resistente comparativamente às armaduras que fariam parte dos provetes.



Figura 4.28- Exemplificação dos dispositivos de ancoragem

Para tal ser exequível teve que ser comparada a resistência à tração das armaduras $\phi 10$, $\phi 12$ e $\phi 16$ com a carga responsável pela fendilhação estabilizada do provete correspondente. A resistência à tração dos varões nervurados é realizada com o recurso à seguinte fórmula:

$$N_{t,rd,\phi} = f_{yk}A_{\phi} \quad \text{Eq. 4.5}$$

Sendo f_{yk} a tensão máxima dos varões, considerando tratar-se de um aço da classe A500 e A_{ϕ} a área da secção transversal correspondente. O cálculo das cargas resultantes e respetivas verificações são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9- Comparação da carga referente à fendilhação estabilizada de um provete de betão armado e resistência à tração do respetivo varão

Fendilhação estabilizada de um provete de betão armado	Resistência à tração do varão	Verificação: $N_{t,Rd} > N_{cr,est}$,OK!
$N_{cr\phi 10,est} = 39,19kN$	$N_{t,Rd,\phi 10} = 39,27kN$	OK!
$N_{cr\phi 12,est} = 39,86kN$	$N_{t,Rd,\phi 12} = 56,55kN$	OK!
$N_{cr\phi 16,est} = 41,54kN$	$N_{t,Rd,\phi 16} = 100,53N$	OK!

Pela análise da Tabela 4.9 pode ser concluído que este sistema oferece a possibilidade de conduzir a ancoragem dos provetes, sem ser necessária a maquinação das pontas dos varões, reduzindo os custos associados. Os únicos encargos deste sistema são as cunhas e acopladores necessários, que embora tenham um custo superior à maquinação das pontas de um varão unitário, podem ser reutilizados e como tal, tornam-se uma solução mais vantajosa a médio/longo prazo. Depois de selecionada e verificada a solução para a ancoragem do provete, serão elaboradas diferentes análises ao nível da capacidade de um varão, por si só, suste carregamentos constantes ao longo do tempo, aplicar variações de carga reduzidas, comparação do momento torsor aplicado com o dimensionado e, ainda, será investigada a possibilidade de conhecer a carga aplicada através da utilização de um transdutor de deslocamento.

De forma a validar a capacidade do varão em permanecer sob carga constante, foi executado um ensaio sobre um varão $\phi 12$ com as pontas maquinadas tipo $M10$. O ensaio, representado na Figura 4.29, compreendeu a utilização de vários dispositivos: uma célula de carga que fornece a carga aplicada, ancorada à base de um pórtico; um extensómetro, ligado a meio comprimento do varão, que mede as deformações ao longo do teste; uma porca, que é responsável pela ancoragem e aperto do varão contra a parte superior do pórtico; um sistema de aquisição que regista os esforços medidos pela célula de carga e os deslocamentos originados pelo extensómetro. Este ensaio foi meramente utilizado para a compreensão da capacidade do varão em suste cargas constantes, o que não impossibilita a utilização do mesmo, tendo este as extremidades roscadas, contrariamente ao que foi concluído anteriormente, sobre a inviabilidade resultante da sua maquinação.

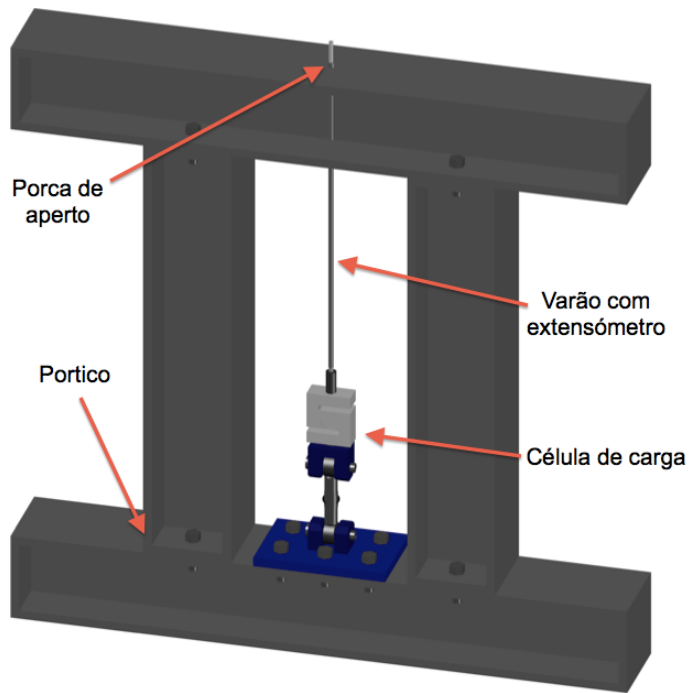


Figura 4.29- Esquematização do sistema de ensaio ao varão

Neste ensaio, o varão foi carregado até aos $18,65\text{kN}$, aproximadamente. Por questões logísticas o ensaio pôde decorrer, apenas, durante um dia, tendo por sinal a duração de 18h . A Figura 4.30 mostra o gráfico resultante do ensaio em questão, após ser atingido o patamar de carga pretendido, onde é possível verificar alguma redução da carga ao longo do tempo. Mesmo tendo variado, o varão teve um comportamento bastante satisfatório na medida em que a carga perdida corresponde a cerca de $1,34\%$ da carga total, aproximadamente de $0,25\text{kN}$, ($= 25\text{kg}$).

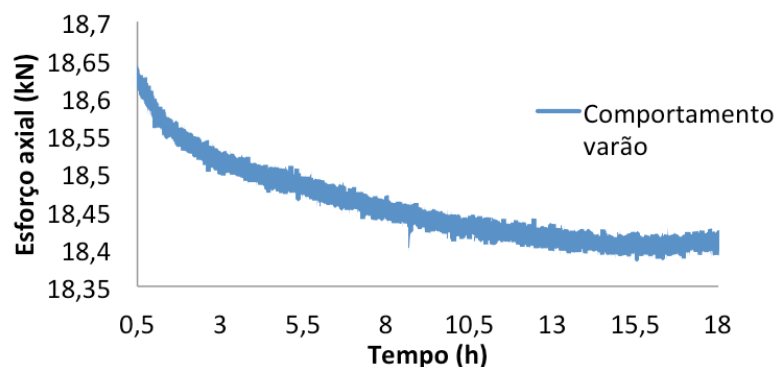


Figura 4.30- Gráfico resultante do ensaio de varão sobre carga constante, após carregamento

A relaxação na zona de ancoragem, pode ter estado na causa desta variação. Com base no CEN (2004a), calculou-se a relaxação do varão assumindo que este é pré-esforçado, cujo resultado é apresentado na Tabela 4.10. Contudo, com base no regulamento existem três classes para a quantificação deste fenómeno. Pelo facto do varão não se enquadrar em nenhuma das classes em questão, a relaxação foi calculada para todas as classes, sendo o resultado apresentado a seguir:

Tabela 4.10- Perdas por relaxação calculadas pelo CEN (2004a)

Classe	Expressão	Perda de carga (kN)
1	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 5,39\rho_{1000}e^{6,7\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ Eq. 4.6	0,989
2	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 0,66\rho_{1000}e^{9,1\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ Eq. 4.7	0,131
3	$\frac{\Delta\sigma_{pr}}{\sigma_{pi}} = 1,98\rho_{1000}e^{8\mu} \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75(1-\mu)} 10^{-5}$ Eq. 4.8	0,518

Em que:

- $\Delta\sigma_{pr}$ é o valor absoluto das perdas de pré-esforço devidas à relaxação;
- σ_{pi} é o valor absoluto da tensão inicial de pré-esforço ($\sigma_{pi} = \frac{18,65}{A} kPa$);
- t é o tempo depois da aplicação de pré-esforço ($t = 18horas$);
- $\mu = \frac{\sigma_{pi}}{f_{pk}}$, f_{pk} é o valor característico da resistência à tração do aço de pré-esforço ($f_{pk} = \frac{23,15}{A} kPa$);
- ρ_{1000} é o valor da perda devida à relaxação (em %), às 1000h depois da aplicação de pré-esforço, os valores desta incógnita podem ser considerados iguais a 8% para Classe 1, 2,5% para a Classe 2 e 4% para a Classe 3;
- A é a área da secção transversal do varão em m^2 ;

De facto existem algumas diferenças nos resultados gerados pelo regulamento (CEN (2004a)) relativamente ao resultado do ensaio, contudo, é possível concluir que a perda de carga

durante o ensaio é perfeitamente plausível, visto encontrar-se entre os valores obtidos no cálculo.

Será agora reportado um ensaio, com o mesmo sistema esquematizado na Figura 4.29, em que se regista a carga aplicada resultante do aperto do varão com uma chave de aperto mecânico. Esta prática tem como objetivo comparar os resultados obtidos, em termos de força e momento torsor, com os pressupostos teóricos, enunciados nas expressões Eq. 3.14 e Eq. 3.29 ($T = F_iKD$), obtendo os valores do coeficiente de atrito, K . Adicionalmente, e visto que o sistema deste ensaio envolveu a utilização de uma célula de carga podem ainda ser tiradas conclusões acerca da capacidade deste atuador, formado pela ligação parafuso/porca, aplicar variações de esforços reduzidas. O ensaio consiste em aplicar esforços axiais de tração no varão, com o auxílio de uma chave dinamométrica. A chave foi inicialmente regulada para um momento torsor de $10N/mm$. Quando este momento torsor é alcançado, a chave emite um sinal para que o operador perceba que este valor foi atingido. Este processo é repetido, em intervalos de $10N/mm$, até serem obtidos $60N/mm$. Paralelamente, a célula de carga regista a carga instalada pela aplicação dos respetivos momentos torsores. Na Figura 4.31 estão representados os resultados de dois ensaios realizados.

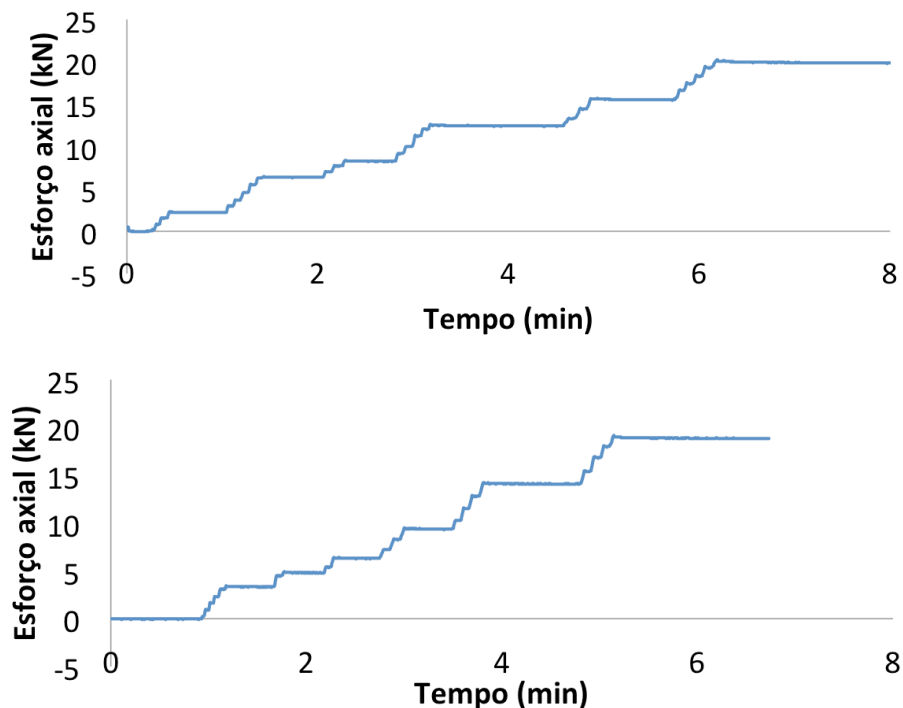


Figura 4.31- Gráficos resultantes de dois ensaios de aplicação de momento torsor e arquivo da carga correspondente

É possível reparar, pela observação da Figura 4.31, que o momento torsor aplicado não corresponde exatamente ao mesmo esforço axial nos dois ensaios, tal como também é observado na Tabela 4.11. Como tal, pressupõem-se que estas variações possam estar relacionadas com o atrito desencadeado na interface entre os dentes do parafuso e da porca, resultantes do desgaste dos mesmos. Assim, conclui-se que existem algumas diferenças dos resultados relativamente às expressões Eq. 3.14 e Eq. 3.29 do Capítulo 3, pois na Tabela 4.11 o valor do coeficiente de atrito, retirado pela mesma expressão, varia substancialmente. Mesmo assim, importa salientar que não se pretende conduzir o ensaio controlando a carga pelo momento torsor, mas sim pelo auxílio de controlo de força (ex: célula de carga). De facto, a expressão torna-se realmente útil para um caso de dimensionamento, apelando desta forma para a especial atenção ao atrito adotado.

Tabela 4.11- Representação dos esforços e coeficientes de atrito, de cada ensaio, para correspondente momento torsor

T (N/mm)	F1°Ensaio (kN)	K1°Ensaio	F2°Ensaio (kN)	K2°Ensaio
10	2,24	0,45	3,37	0,29
20	6,25	0,32	4,84	0,41
30	8,26	0,36	6,34	0,47
40	12,45	0,32	9,39	0,43
50	15,55	0,32	14,13	0,35
60	19,92	0,30	18,9	0,32
	Valor médio	0,32	Valor médio	0,38

Apesar das diferenças denotadas nos resultados explanados nos gráficos da Figura 4.31, é possível reparar, que este sistema permite variar a carga aplicada em intervalos bastante reduzidos ($\approx 0,25kN$), apesar de este valor não ser possível observar concretamente nos gráficos (primeiro degrau do 2º gráfico da Figura 4.31), presumindo portanto a facilidade na aplicação de esforços refinados. Assim, este sistema mostra a viabilidade na aplicação de deformações diminuídas, requeridas para um ensaio de restrição à deformação.

Seguidamente, foi realizado um conjunto de ensaios de forma a retirar conclusões acerca da possibilidade de conhecer a carga aplicada no varão através do conhecimento da deformação aplicada, registada por um extensómetro, permitindo desobrigar a utilização de célula de carga nos ensaios de restrição à deformação. O primeiro ensaio englobou a utilização de um atuador hidráulico, que aplica os esforços axiais, uma célula de carga, que regista os respetivos esforços, e um extensómetro para a medição das deformações instauradas num varão $\phi 12$ com as pontas maquinadas tipo *M10*, representado na Figura 4.32. No segundo aplicou-se a carga axial, pelo aperto de uma porca, e utilizou-se o extensómetro para medição dos deslocamentos obtidos, num varão $\phi 12$, ligado superiormente por um acoplador a um *M16*, sobre o qual é aplicado o aperto, e ancorado inferiormente por uma cunha passiva, exibido na Figura 4.33. O segundo ensaio foi repetido, sendo que no primeiro utilizou-se as pontas típicas de um varão nervurado e no segundo foram retiradas as nervuras. Este procedimento foi tido em conta para compreender qual a influência das nervuras, visto que podem reduzir a área de contacto com as cunhas e, conseqüentemente, diminuir a aderência existente na interface entre o varão e a cunhas. Assim, no primeiro ensaio conhece-se a carga aplicada, a respetiva deformação e sabe-se que o módulo de elasticidade do varão é de $200GPa$. No segundo, apenas se sabe a deformação instalada pela aplicação de carga por aperto manual e naturalmente que o módulo de elasticidade será de $200GPa$ também. Ou seja, sabendo as deformações aplicadas, nos dois ensaios, e sabendo a área da secção transversal do varão onde é colocado o extensómetro, deverá ser possível conhecer a carga aplicada. Se a carga aplicada para determinada deformação no primeiro ensaio for igual à carga e correspondente deformação do segundo ensaio, será alcançado o mesmo valor de módulo de elasticidade. Os resultados dos ensaios conduzidos com o sistema de aperto, da Figura 4.33, estão expostos na Figura 4.34.

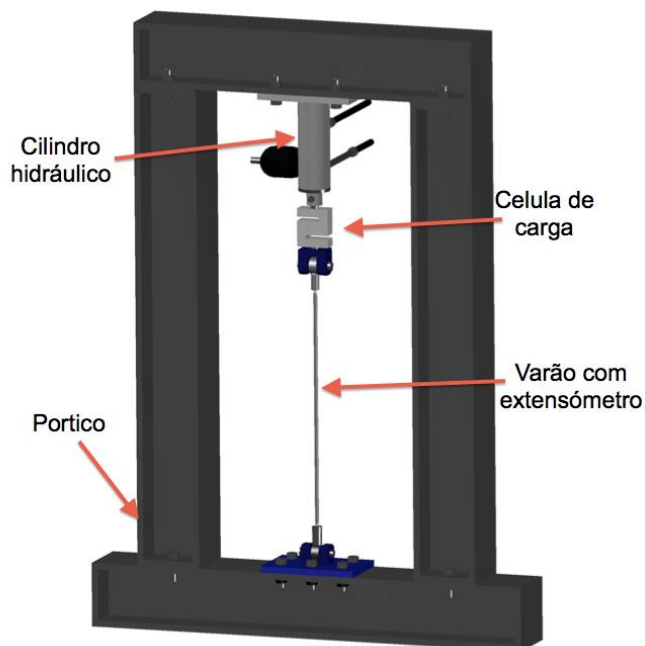


Figura 4.32- Sistema de ensaio com célula de carga e cilindro hidráulico

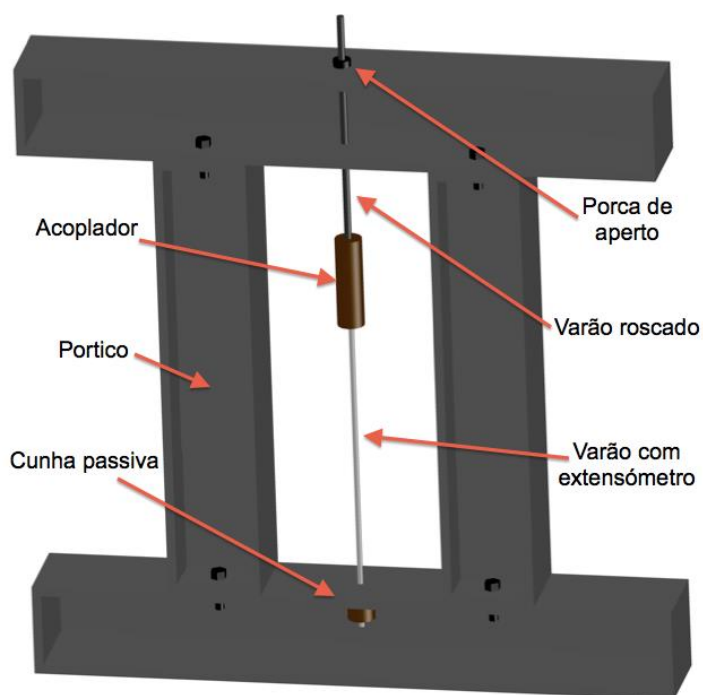
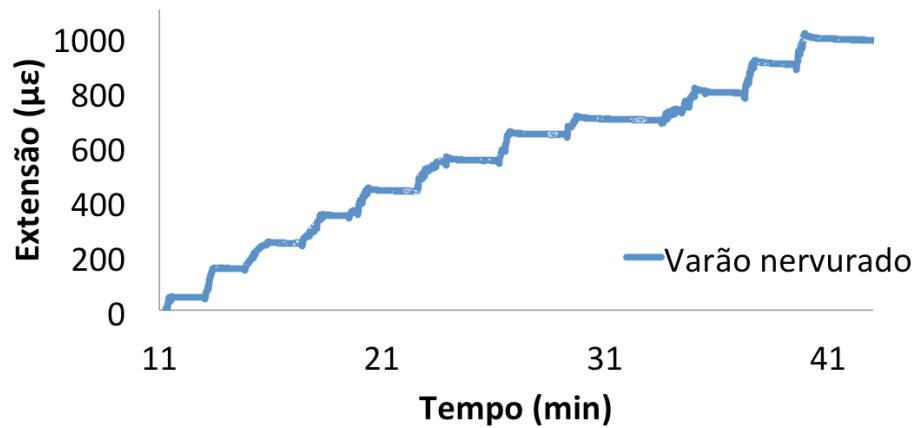
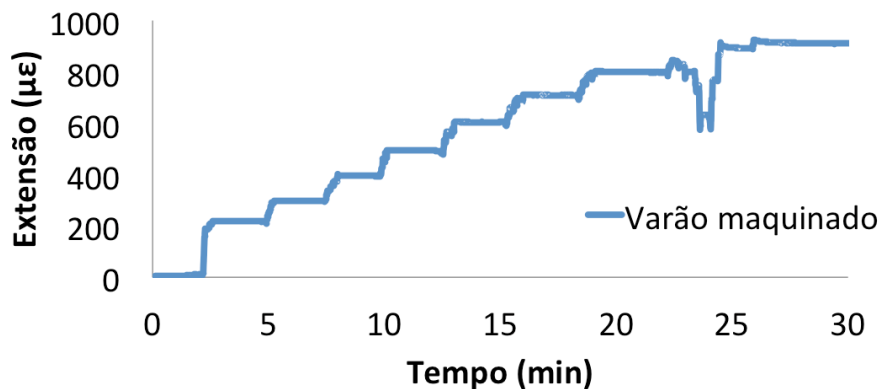


Figura 4.33- Sistema de aplicação de carga por aperto



a) Ensaio realizado no varão com pontas nervuradas



b) Ensaio realizado no varão com pontas sem nervuras

Figura 4.34- Gráficos representativos dos ensaios com cunhas

Os gráficos da Figura 4.34 mostram determinadas perdas de extensão ao longo do carregamento, particularmente no ensaio realizado no varão sem pontas nervuradas. Estas perdas de extensão e, ao mesmo tempo, de carga estão relacionadas com o escorregamento do varão que se encontra ancorado pela cunha, situada no interior do acoplador. Apesar deste feito, a extensão foi facilmente recompensada como é possível reparar na Figura 4.34b). No futuro serão tomados alguns percalços no que remete para a pregagem das cunhas, de forma a pré-tensionar o varão levando à criação de uma aderência inicial suficiente para evitar este fenómeno. O gráfico representado na Figura 4.35 mostra as extensões e cargas axiais referentes ao sistema de ensaio revelado na Figura 4.32.

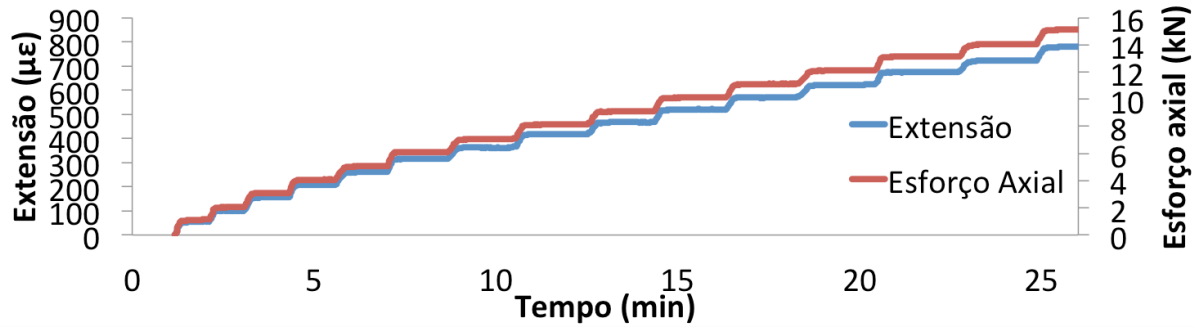


Figura 4.35- Resultado do ensaio conduzido com cilindro hidráulico

A colocação do extensómetro conduz à perda de parte da secção transversal do varão na zona onde este é colocado. Como tal, depois de ser reduzida a secção e antes de ser colocado o mesmo, foram feitas 4 medições dos diâmetros do varão, em diferentes direções. Assim, foi possível chegar à área total após redução, tal como é exemplificado na Figura 4.36, que foi posteriormente calculada de forma simplificada, considerando, apenas o valor médio dos diâmetros registados: {11,05; 11,1; 10,89; 11,2}mm.

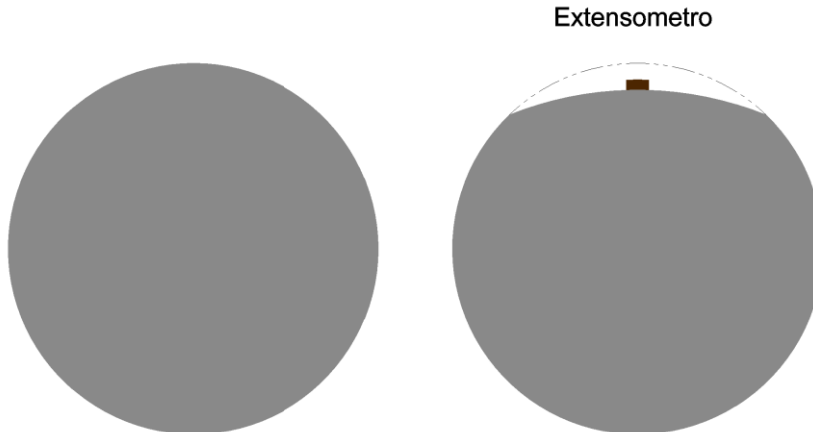


Figura 4.36- Representação do varão antes e depois de colocado o extensómetro

Através da área da secção transversal, juntamente com os gráficos das extensões, exemplificados na Figura 4.34, pode ser determinado o esforço axial resultante. A comparação dos resultados dos dois tipos de ensaio em termos de esforço axial versus extensão, para posterior conclusão acerca do módulo de elasticidade, é apresentada na Figura 4.37.

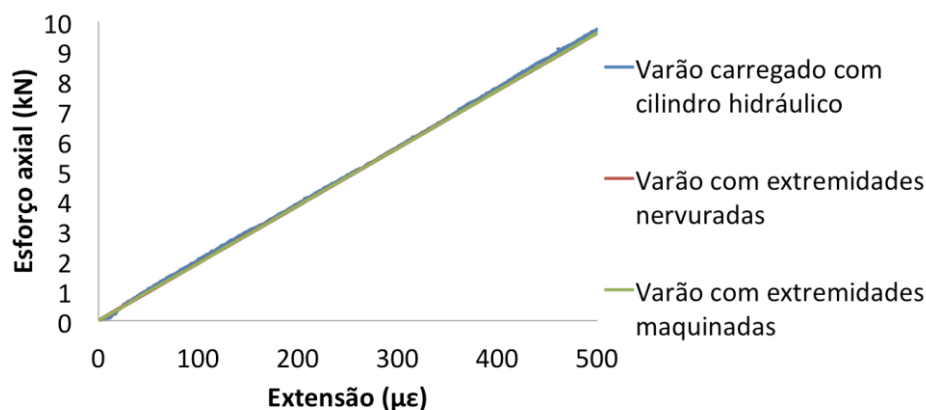


Figura 4.37- Gráfico Carga-Extensão de ensaios de aperto e com cilindro hidráulico

O gráfico da Figura 4.37 mostra que o comportamento dos varões é praticamente o mesmo. Sendo assim, conclui-se que a carga aplicada no sistema pode ser avaliada com o recurso a um extensómetro para a medição das respetivas deformações e, como tal, o sistema de ensaio de restrição ativa não necessitará da utilização de célula de carga.

Seguidamente, foram ainda realizados dois ensaios sobre um provete de betão armado com um varão $\phi 12$ (composição A), de idade superior aos 28 dias, como tal a sua retração já não apresentava intensidade relevante, utilizando o novo método de aplicação de carga. Este ensaio envolveu a utilização de um extensómetro, ligado ao varão na zona embebida de betão, e de uma célula de carga, registando os esforços aplicados no provete, tal como exemplificado na Figura 4.38. Este foi sujeito a vários ciclos de carga em patamar com intervalos de $1kN$, como pode ser observado na Figura 4.39.

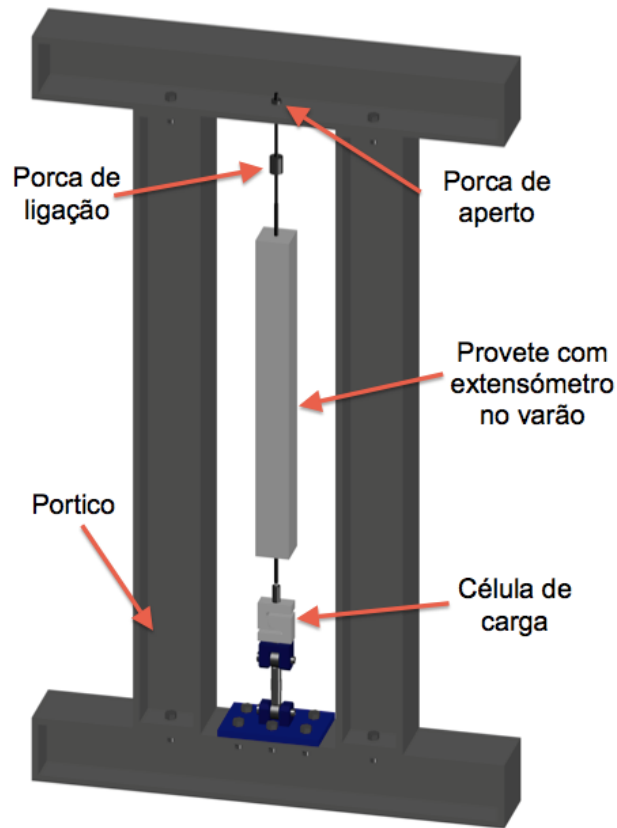


Figura 4.38- Sistema de ensaio utilizado para provete de betão armado

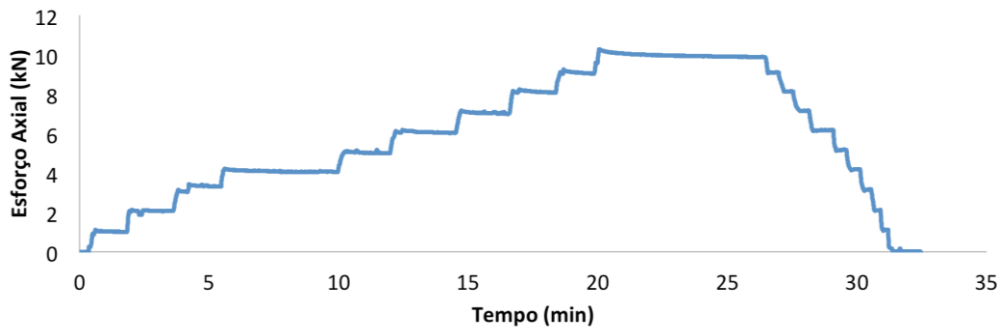


Figura 4.39- Gráfico resultante do ensaio de carga em patamares sobre provete de betão armado

No gráfico da Figura 4.39 observa-se a continuidade e a precisão que o atuador por aperto confere neste ensaio, quer em termos de carga quer em termos de descarga. O ensaio anterior foi repetido de forma a obter uma base de melhor compreensão acerca do comportamento do provete quando sujeito aos esforços aplicados pelo atuador. Com estes ensaios foram desenhadas as curvas de esforço axial versus extensão para posterior comparação com as curvas geradas nos ensaios realizados no varão isolado, como pode ser visto na Figura 4.40.

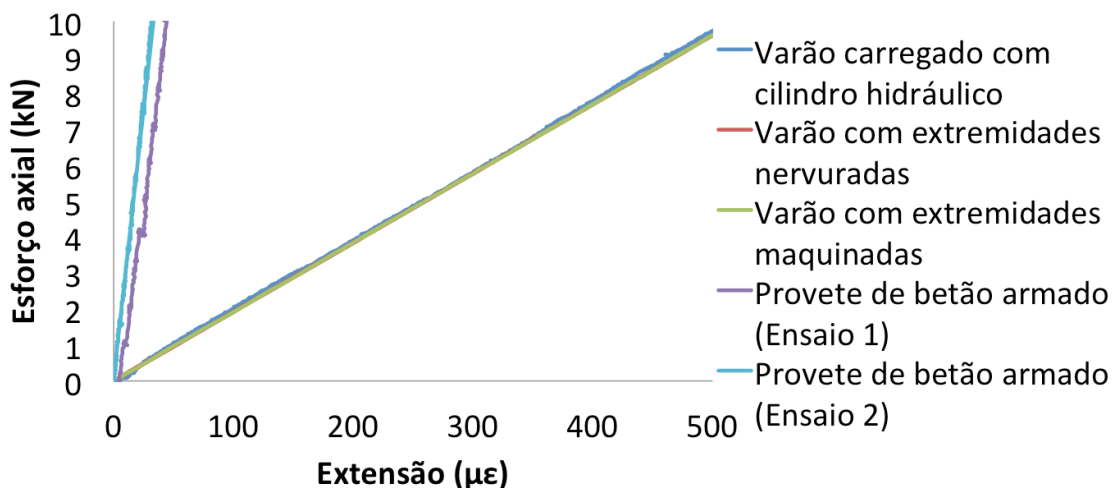


Figura 4.40- Gráfico comparativo do desempenho de um provete de betão armado e de um varão só

Da Figura 4.40 retira-se a diferença evidente entre os comportamentos do provete de betão armado e do varão sujeitos a esforços de tração. Denota-se, ainda, alguma diferença nas curvas de Ensaio 1 e do Ensaio 2 no provete de betão armado, referentes aos ensaios executados no provete de betão armado. Esta variação das curvas pode estar na origem de algum erro na medição, provavelmente relacionada com o desgaste da colagem do extensómetro, visto que foi sujeito a múltiplos ensaios de carga/descarga.

Referente ao comportamento do atuador por aperto, foi adicionalmente elaborado um ensaio ao provete sob carga constante com o mesmo sistema de ensaio da Figura 4.38. O provete foi carregado até uma carga próxima dos $10kN$ e permaneceu em carga constante durante praticamente dois dias, sendo representada na Figura 4.41 o comportamento do varão após ser atingido o patamar de carga pretendido. O ensaio decorreu na cave do laboratório, cujas variações da temperatura e humidade relativas são suficientemente reduzidas, de forma que pode considerar-se não haver influência no que respeita a variações volumétricas sujeitas pelo provete.

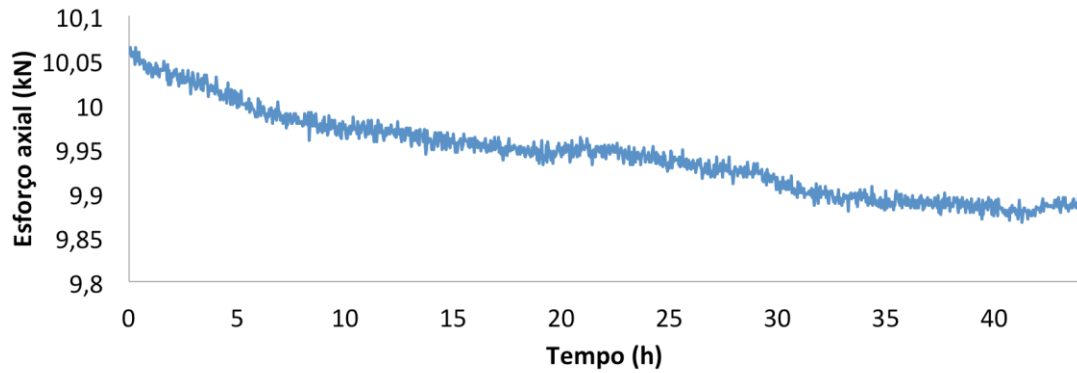


Figura 4.41- Gráfico representativo de ensaio em carga constante num provete de betão armado

O gráfico da Figura 4.41, que representa a curva do comportamento do provete sujeito a carga constante, apresenta uma reduzida diminuição de carga ao longo das 44 horas de ensaio, podendo estar relacionada com a fluência do provete. Contudo, esta perda de carga é praticamente desprezável, na medida em que o provete nem chega a perder $0,2kN$, ($= 20kg$), tratando-se de uma diferença relativamente reduzida, comparativamente ao nível de carga estabelecido e na necessidade de recarregar o provete, este é facilmente reposicionado.

É possível concluir, através dos ensaios realizados, a alternativa escolhida para a conceção do novo atuador atingiu o sucesso necessário para a sua implementação no novo sistema de restrição à deformação. Além de fiável, esta solução atinge custos especialmente reduzidos em comparação com os montantes acarretados nos sistemas atuadores utilizados hoje em dia. O sistema de ensaio total encontra-se representado na Figura 4.42.

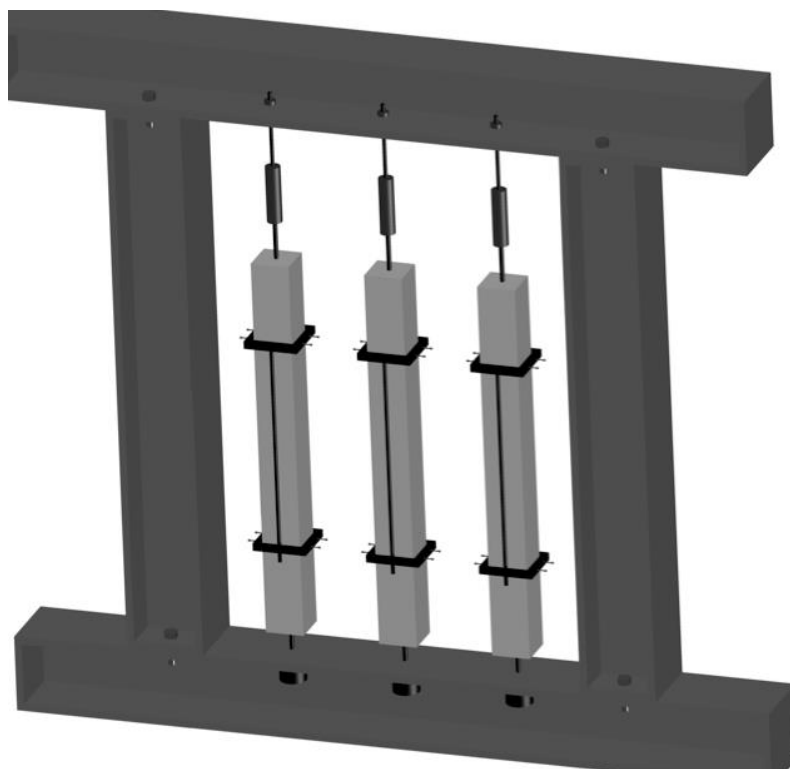


Figura 4.42- Sistema de ensaio de restrição ativa à deformação

4.2.2 Sistema de medição de deformações

O sistema de medição de deformações passou pela utilização de uma solução de baixo custo. Como tal, alternativamente à utilização de LVDTs que requerem a utilização de sistemas de aquisição, sendo estes além de bastante dispendiosos, não se encontrarem à disposição, em termos de duração, de qualquer investigador do laboratório da Universidade do Minho, considerou-se o emprego do método desenvolvido por De Sousa (2011).

Este método sujeita a utilização de um cartão SIM cortado em duas metades, sendo que estas metades são coladas em duas superfícies que deslizam entre si, numa determinada direção conhecida. Os deslocamentos originados provocam o deslizamento relativo das duas superfícies e, por conseguinte, das duas metades do cartão SIM. Sendo assim, é possível avaliar a distância relativa entre as duas metades com a utilização de um microscópio, capaz de ampliar a imagem até 400x, como é possível reparar na Figura 4.43, juntamente com um computador portátil.

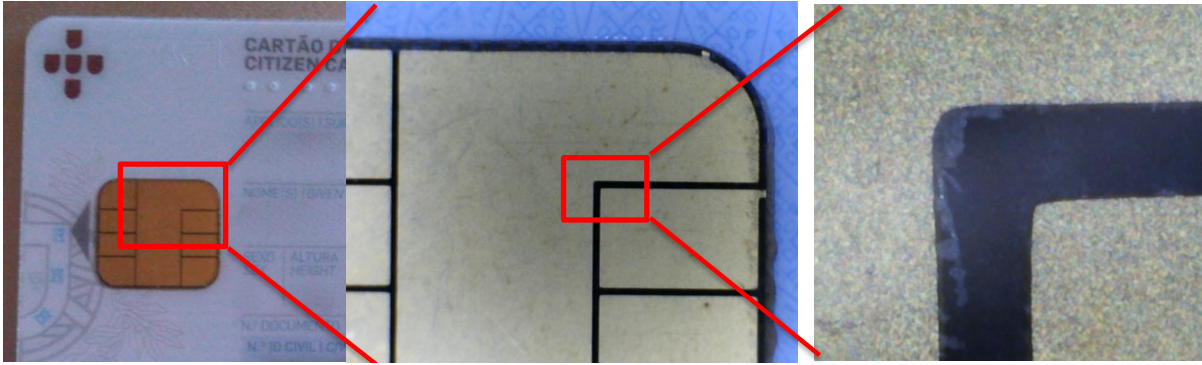
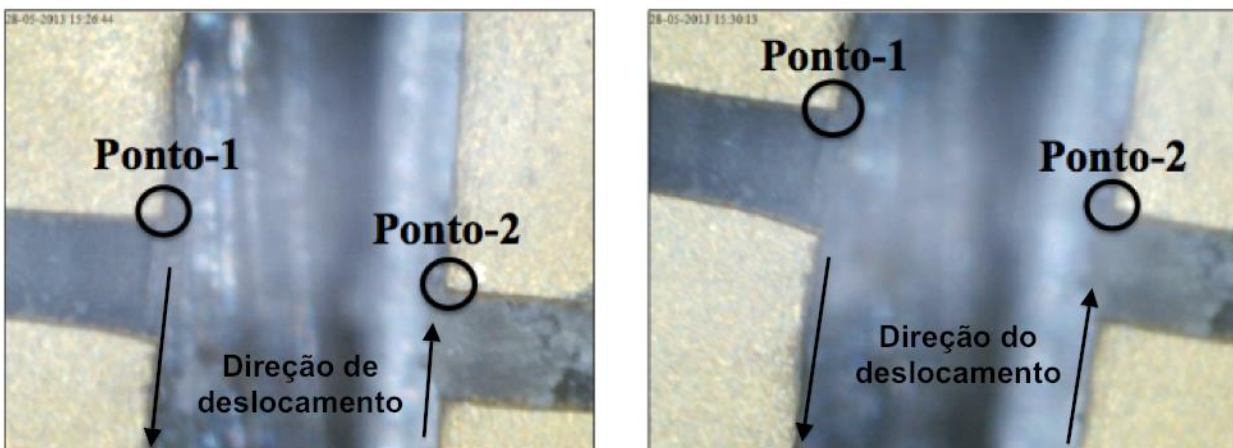


Figura 4.43- Representação da amplitude de focagem do microscópio, desde uma imagem com câmara normal e focagem a 20x e 400x com o microscópio

Este método consiste em captar as deformações através do microscópio que amplia e fotografa a imagem captada. A partir daí o processo é, basicamente, calcular a distância entre dois pontos, neste caso, entre dois pontos de referência pertencentes às duas metades do SIM na unidade pixel, tal como exemplificado na Figura 4.44, (Neste caso mede-se em pixel e retira-se em micron). Porque a unidade de medida de interesse para este ensaio é o micrómetro, é utilizada uma imagem de uma lamela ampliada, sendo que esta tem em si uma régua micrométrica, conforme é possível observar na Figura 4.45, possibilitando relacionar as unidades pixel com unidades micron.



a) Imagem-1

b) Imagem-2

Figura 4.44- Representação dos pontos de referência



Figura 4.45- Lamela micrométrica

Concluindo, no início de um ensaio é captada uma imagem de um ponto de cada SIM (pontos de referência), estando estes, previamente, à distância $d_{inicial}$. Após uma determinada aplicação de carga, que leva à deformação do provete, é retirada uma nova imagem. Nesta segunda imagem, os pontos que inicialmente estavam a uma distância $d_{inicial}$, passam a estar a uma distância d_1 . Através de um programa de desenho é possível medir estas distâncias pelo processo apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12- Passos relativos à medição de determinada deformação

1º	Inserir imagens no programa de desenho
2º	Inserir altura e largura das imagens conforme a resolução (por exemplo: comprimento=640 e altura=480), para que todas as medições executadas pelo programa sejam em pixel
3º	Medição entre dois pontos da primeira imagem, $d_{inicial}$
4º	Medição entre os mesmos pontos da segunda imagem, d_1
5º	A deformação resultante do carregamento é igual à diferença entre as duas medições calculadas: $d_{inicial \rightarrow 1} = d_1 - d_{inicial}$ (em unidade pixel)
6º	À deformação $d_{inicial \rightarrow 1}$ terá que se multiplicar um factor que relacione a unidade pixel e unidade micron (utilização da lamela), para que o resultado final seja dado em micron

De forma a dispensar a utilização da cola quente e betume poliéster, citados anteriormente, pelo facto de não reunirem as características necessárias para a condução de ensaios de

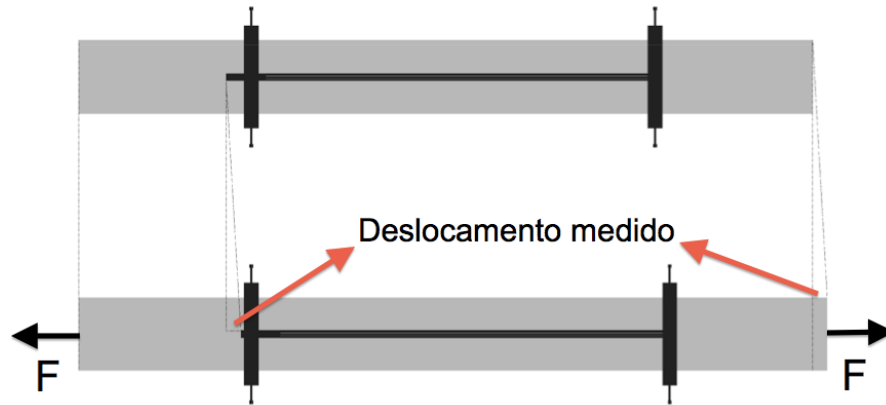


Figura 4.48- Representação dos deslocamentos captados pelo sistema de medição

Foi conduzido um ensaio para a certificação do novo sistema. Para tal, um provete de betão armado, da composição A, já utilizado em ensaios antecedentes, foi instrumentado com o sistema de medição dotado de duas metades de um cartão SIM, uma no extensor e outra no anel. O sistema de ensaio utilizado, envolveu a utilização de uma célula de carga de forma a registar os esforços aplicados no provete, como pode ser observado através da Figura 4.38. O provete foi carregado para vários níveis de carga, tal como exemplificado na Figura 4.49, sendo que para cada nível foi capturada uma imagem, situada a meio de cada patamar, para, posteriormente, ser realizado o tratamento. A aplicação de carga assume intervalos diferentes, razão pela qual é possível reparar que não existiu uma variação previamente definida para o desenvolvimento do ensaio.

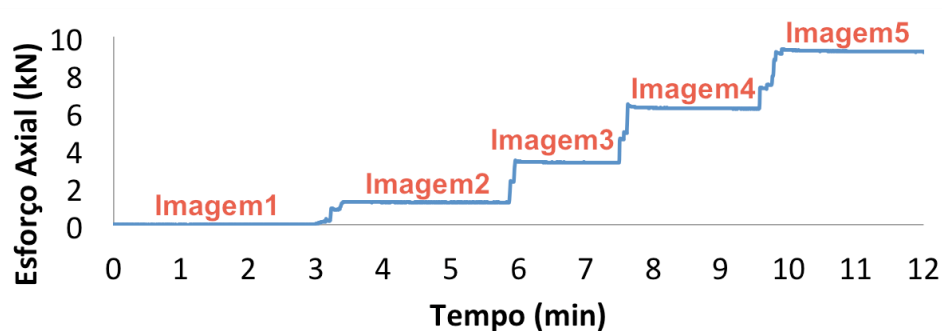


Figura 4.49- Patamares de carregamento instalados no provete

Contudo, não houve oportunidade de utilizar outro tipo de sistema de medição de forma a comparar com este, como tal, para cada patamar foi registada a carga aplicada para cada

imagem capturada e, posteriormente, foi construído uma curva de referência, de características aproximadas ao provete utilizado. Para as características do betão foi adotado apenas o módulo de elasticidade de $30GPa$. O provete tem de secção transversal $100 \times 100mm^2$ e tem um varão concêntrico $\phi 12$. A curva carga versus deslocamento resultou do cálculo do deslocamento obtido, num comprimento de $550mm$ sobre a aplicação de uma carga crescente em intervalos de $0,1kN$, através da seguinte expressão:

$$\Delta L = \frac{NL}{EA_{hom}} \quad \text{Eq. 4.9}$$

Sendo assim, foi possível construir o gráfico da Figura 4.50 que representa o comportamento do provete e os deslocamentos obtidos pela captura das imagens para os correspondentes níveis de carga.

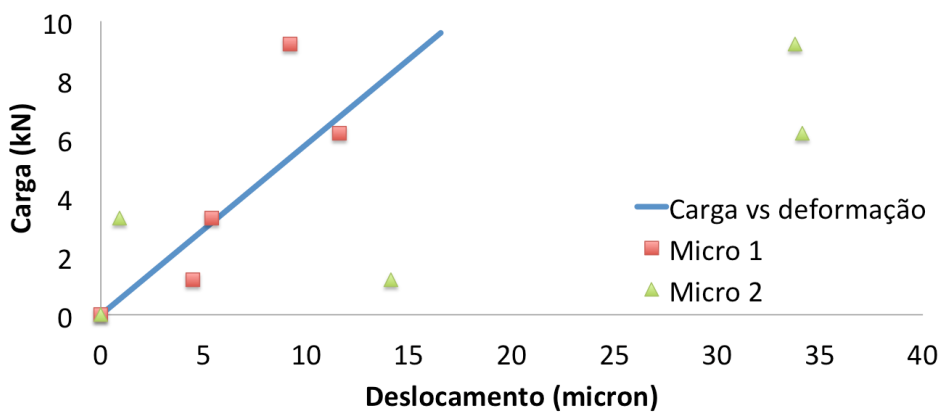


Figura 4.50- Resultado da comparação dos deslocamentos teóricos com deslocamentos medidos com microscópio

É notável a diferença entre as deformações teóricas e as deformações resultantes da utilização do microscópio. Supõem-se que esta diferença se deva especialmente ao tratamento das imagens, sendo que este processo é relativamente difícil e de precisão reduzida. Pretende-se com isto transmitir que a distância entre pontos é forçosamente dependente da posição em que se consideram os pontos de referência, ou seja, um ponto que inicialmente se encontra em determinada coordenada, na segunda imagem capturada pode ser considerado uma fração ao lado, de forma a comprometer o resultado final. Para este método ser mais consistente dever-

se-ia aumentar a precisão das imagens ou reduzir o tamanho dos pontos considerados para minorar a probabilidade de falha.

Com o intuito de melhorar a precisão do método anterior foi resolvido substituir a utilização dos cartões SIM por lamelas micrométricas. Assim, a sobreposição das régua micrométricas, que fazem parte das lamelas, aumentam a precisão da imagem e, como tal, induzem a minoração da área em que os pontos podem ser utilizados como referência, diminuindo a probabilidade de insucesso no tratamento das imagens, tal como é possível observar na Figura 4.51.

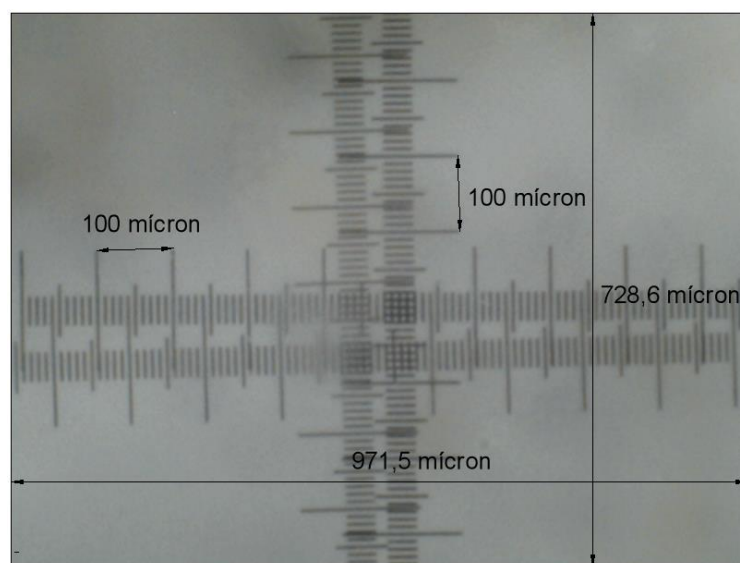


Figura 4.51- Imagem de lamelas sobrepostas captada com microscópio

Além disso, o resultado final poderá ser dado em microns, ao contrário do método anterior, em que é necessária uma conversão para resultar esta unidade. Posto isto, foi colada uma lamela ao anel inferior, na posição horizontal, e foi cortada outra lamela, resultando apenas a zona da régua micrométrica, de forma a poder ser colada no extensor do sistema de medição, tal como exemplificado na Figura 4.52. Seguidamente, foram utilizados calços, resultantes das sobras da lamela cortada, para o posicionamento da lamela horizontal, a exterior, de forma a obter a altura necessária para que deslize, perfeitamente, sobre a outra. Adicionalmente, foi executada uma peça suplementar que aperta a lamela exterior na direção do anel. Esta peça tem um orifício basal, que permite inserção do microscópio para captação das imagens pretendidas. Para proporcionar um deslizamento gradual, sem saltos provocados pelo atrito, foi resolvido colocar vaselina na interface em que as duas superfícies se intersejam.

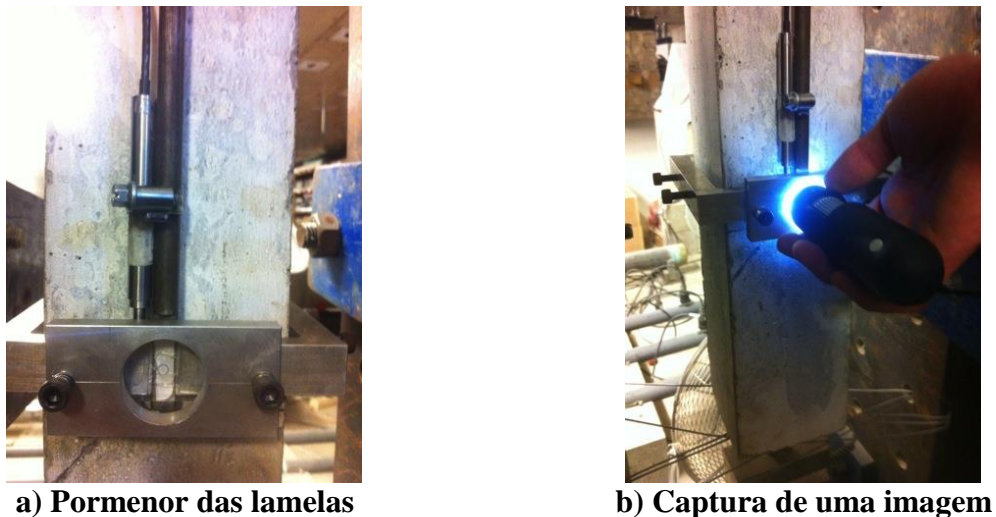


Figura 4.52- Sistema de medição com lamelas

Com objetivo de comparar os deslocamentos obtidos por um LVDT e pelas lamelas sobrepostas foi resolvido efetuar dois ensaios, cujos resultados se encontram na Figura 4.53. Cada ensaio consistiu na aplicação de esforços de tração sobre um provete de betão armado, da composição A, que esteve sujeito a um período suficientemente extenso que não induzisse variações de deslocamento devido à retração. O sistema de ensaio foi o mesmo utilizado que representado na Figura 4.38, com a inclusão do sistema tal como apresentado na Figura 4.52. A aplicação da carga é feita com o recurso ao aperto/desaperto de uma ligação porca-varão. O provete foi sujeito a vários níveis de carga, $1kN$, $3kN$, $6kN$ e $9kN$. Para a medição dos deslocamentos ocorridos durante o ensaio foram utilizados dois sistemas, um LVDT e o sistema com lamelas sobrepostas, que deslizam entre si quando sujeitas a um carregamento. O LVDT foi ancorado ao extensor através de uma braçadeira metálica. O escorregamento que acontece na interface entre as duas lamelas é registado através do microscópio.

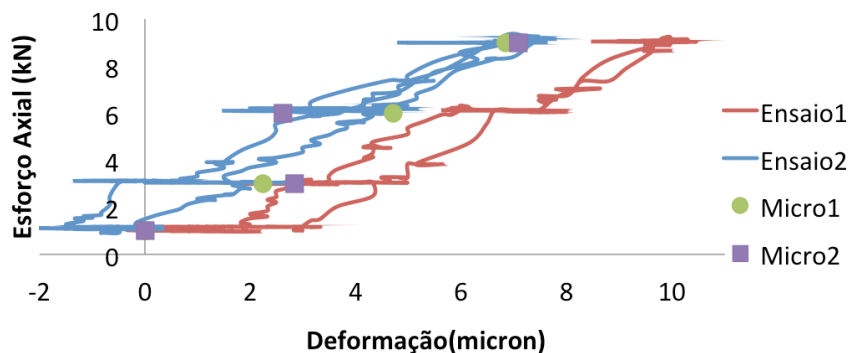


Figura 4.53- Resultado de ensaio de comparação entre LVDTs e microscópio

Com base no gráfico da Figura 4.53 é possível compreender que os resultados estão aquém do que seria pretendido. O comportamento do LVDT não foi o requerido, podendo estar na causa deste resultado a ancoragem incorreta do LVDT ao extensor. Além disso, sempre que é capturado uma imagem o operador toca no anel inferior com o microscópio, podendo esta interferência provocar o desajuste do mesmo. Tirando este obstáculo, o sistema com lamelas sobrepostas exibe potencial na medição de deformações de provetes sujeitos a carregamentos. Apesar de ocorrerem alguns erros observados na passagem para o nível de carga superior (de $1kN$ para $3kN$, por exemplo), é possível obter resultados bastante próximos quando a variação de carga aplicada é maior (de $1kN$ para $9kN$). De facto, para um ensaio de retração impedida, admitindo um limite de deformação de $10\mu m$, este sistema ainda não cumpre totalmente os requisitos necessários para a medição com o nível de detalhe que se pretende. Mais uma vez, a razão que se pensa obter tais resultados, por vezes, errados está relacionada com tratamento de imagens, para tal, propõem-se, para o futuro, a criação de um modelo genérico de uma lamela com o recurso a um microscópio de elevado detalhe. Esta tarefa passaria pelas diferentes fases enunciadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- Processo de melhoramento para o tratamento das imagens

1º	Observação da lamela com um microscópio que ofereça alto nível de detalhe
2º	Criação do modelo genérico, desenhando uma lamela através de um programa de desenho, resultando uma “lamela genérica”
3º	Para todos os ensaios, a lamela genérica seria sobreposta a todas imagens retiradas durante o ensaio, para melhor tratamento das imagens. Ou seja, a lamela genérica seria um desenho da lamela verdadeira, com todos os pontos e retas necessárias para o tratamento

4.2.3 Ensaio piloto

Foi planeada uma campanha experimental envolvendo uma série de combinações de armaduras embebidas em betão reforçado com fibras, de forma a possibilitar o estudo da sinergia entre betão armado com fibras e armaduras convencionais. Inicialmente, com esta campanha pretendia-se o estudo comparativo, ao nível da fissuração, entre códigos teóricos, como o *fib* Model Code (2010) e CEN (2004a), e a utilização dos três sistemas de ensaio

referidos nesta dissertação: i) Sistema *VRF* modificado para betão simples, elaborado por De Sousa (2011); ii) Sistema *VRF* modificado para betão armado, executado por De Sousa (2011); iii) Sistema de aperto parafuso/porca, que decorreria paralelamente ao anterior; Neste contexto foi realizada a referente betonagem, sendo aproveitado para a validação do sistema de ensaios dois provetes, sendo um de betão armado com um varão $\phi 16$ e fibras de aço dispersas $60\text{kg}/\text{m}^3$, da composição B, restrito para ser utilizado no sistema de ensaio de aperto, e um de betão simples (adicionado com fibras na mesma quantidade), provete livre.

Após a betonagem os provetes foram selados e permaneceram como tal até à data do início do ensaio, inicialmente agendada para o 14º dia de idade. Aos 7 dias foram realizados ensaios de compressão e de módulo de elasticidade em provetes cilíndricos tirando conclusões acerca das características do betão. Registou-se que, para esta idade, o betão resistia a 200KN à compressão ($f_{cm} = 11,3\text{MPa}$), e possuía um módulo de elasticidade de 18GPa .

O ensaio de restrição ativa, que inicialmente começaria ao 14º dia de idade, teve que ser adiado para uma data mais tarde, por questões de logística do laboratório da Universidade do Minho. Como tal, os provetes foram mergulhados numa bacia de água, até ao momento em que se cumpriram todas as tarefas complementares, para o início deste, de forma a não se perder a secagem que os provetes estariam sujeitos à medida que envelheciam. Reunidas as condições para o início do ensaio, os provetes foram retirados da bacia e foi passado um pano húmido ao longo das superfícies dos mesmos. Montou-se todo o sistema de ensaio, como pode ser observado na Figura 4.54, nomeadamente, as cunhas de ancoragem, o extensómetro na zona de varão não embebido, utilizado como célula de carga, e o novo sistema de medição para lamelas e LVDTs, tal como exemplificado na Figura 4.52a). O ensaio decorreu no interior da cave do laboratório, sendo que neste local a temperatura varia de forma reduzida, ao contrário da humidade que oferece variações superiores, tal como exposto na Figura 4.55. Os deslocamentos desempenhados entre as lamelas micrométricas não serão analisados nesta fase, visto que no ensaio o limite de deformação pré-definido será controlado, ao longo do tempo, pelo recurso a um LVDT.

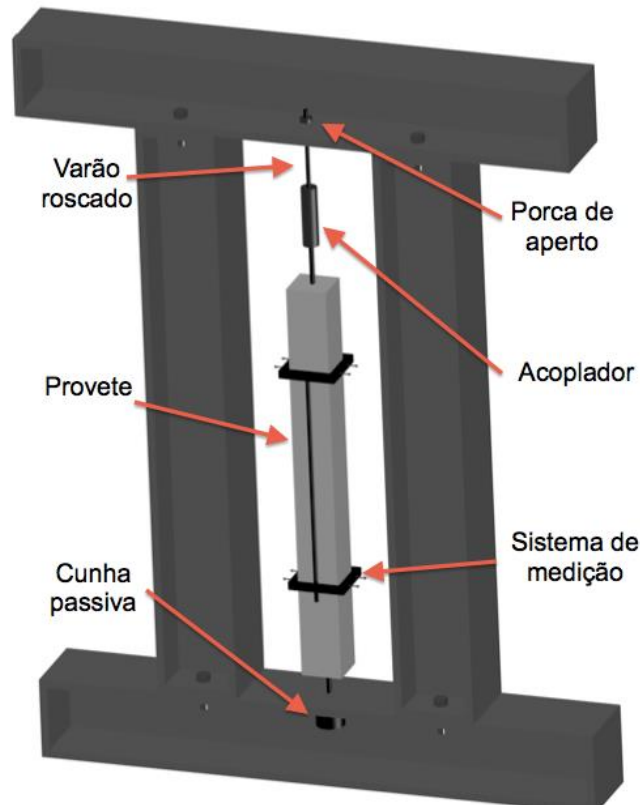


Figura 4.54- Sistema de ensaio de restrição ativa

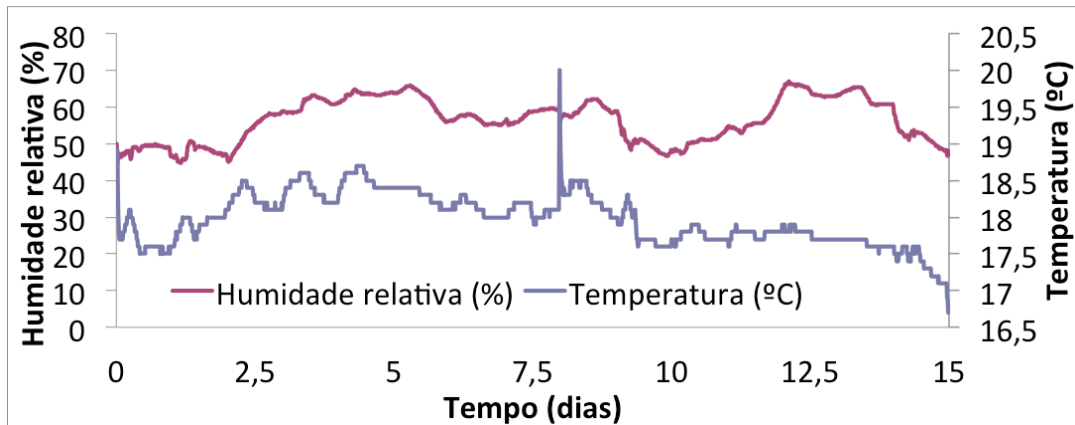


Figura 4.55- Temperatura e umidade relativa na cave do laboratório da Universidade do Minho

O provete restrito foi, inicialmente, sujeito a um esforço de tração de, aproximadamente, 1kN e deixou-se o provete retrair até aos $10\mu\text{m}$, que correspondem a uma extensão limite de $18\mu\epsilon$. O resultado do ensaio pode ser consultado na Figura 4.56.

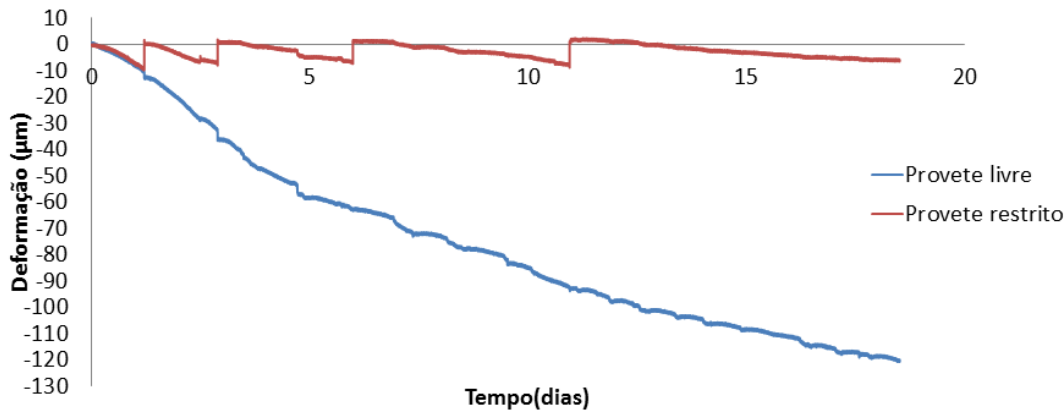


Figura 4.56- Resultado do ensaio de retração ativa

Considera-se que a intensidade da retração, quer do provete restrito quer do provete livre, se encontra dentro do se seria expectável. O facto de o ensaio ter começado posteriormente à data que seria inicialmente pretendida, foi possível apenas estudar a retração por secagem dos provetes de betão endurecidos. É notável o efeito restritivo provocado pela armadura no desenvolvimento dos ciclos de compensação, comparativamente ao ensaio realizado por De Sousa (2011) sobre um provete de betão simples representado na Figura 2.19. Adicionalmente, observa-se que as reposições referentes a cada ciclo são bastante precisas.

A Figura 4.57 mostra o resultado das tensões instaladas no betão, ao longo do ensaio, calculadas segundo a metodologia aplicada por Cusson e Hooegeven (2006), com base na Eq. 2.6.

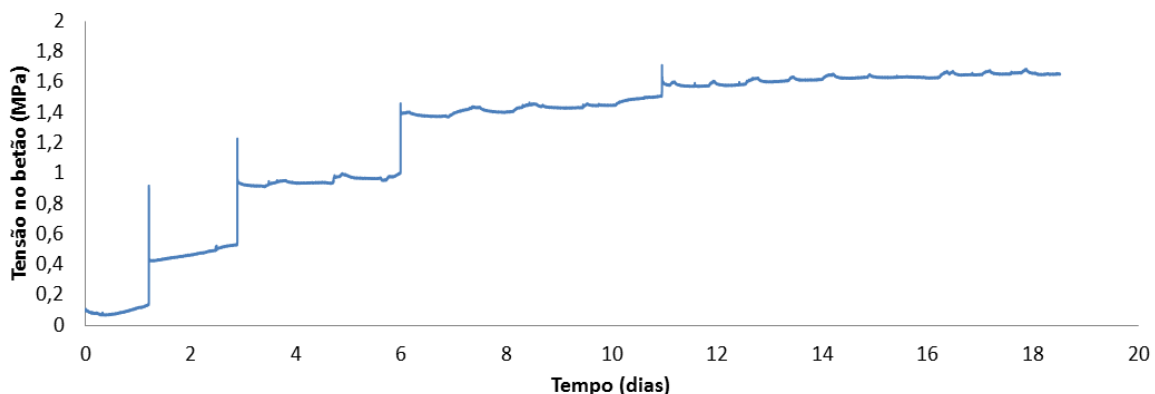


Figura 4.57- Resultado da tensão instalada no betão, segundo Cusson e Hooegeven (2006)

As tensões estabelecidas no betão remetem o que seria espectável, ou seja, verificou-se o aumento da tensão instalada entre o instante inicial e final de cada ciclo, referente à evolução da retração, tal como é explicado no Capítulo 2. Por outro lado o carregamento referente ao último ciclo não é de facto perceptível, pois neste instante o acréscimo de carga aplicada deveria ser da mesma ordem dos anteriores. O módulo de elasticidade, que tende a aumentar à medida que o betão envelhece, atingindo o seu valor residual por volta dos 28 dias, bem como a tensão no betão, são as variáveis da qual depende a deformação elástica. No momento imediatamente após o provete ser carregado a deformação elástica aplicada é equivalente ao limite de deformação predefinido. Considerando o aumento do módulo de elasticidade ao longo do tempo, a tensão aplicada resultante deveria ser da mesma ordem de grandeza. A tensão aplicada nas reposições do provete ao seu comprimento inicial verifica-se que esta tensão anda na ordem dos $0,4MPa$, correspondendo praticamente a uma variação da carga aplicada de aproximadamente $4kN$. Como explicado anteriormente, a carga prevista para a reposição do provete, considerando um limite de deformação de $10\mu m$ sobre um comprimento total de $550mm$ para um betão de módulo de elasticidade de $30GPa$, é de aproximadamente $6kN$. Comparando as cargas previstas e as cargas resultantes do ensaio verifica-se, desde logo, que o betão utilizado não pertencia à qualidade pretendida.

Adicionalmente, com o provete restrito utilizado no ensaio anterior, em que não foi possível atingir tensões, de tal forma elevadas, que conduzissem à fissuração do mesmo, foi decidido realizar um ensaio de tração direta, utilizando o mesmo equipamento de ensaio, representado na Figura 4.54, com o intuito de atingir este fenómeno, representado na Figura 4.58. Previamente a este ensaio o provete foi carregado e posteriormente descarregado, observável na Figura 4.58. Este procedimento foi realizado para subsequentemente ser comparado o seu comportamento, ao nível de carga e deformação, ao que seria o resultado do ensaio de tração direta.

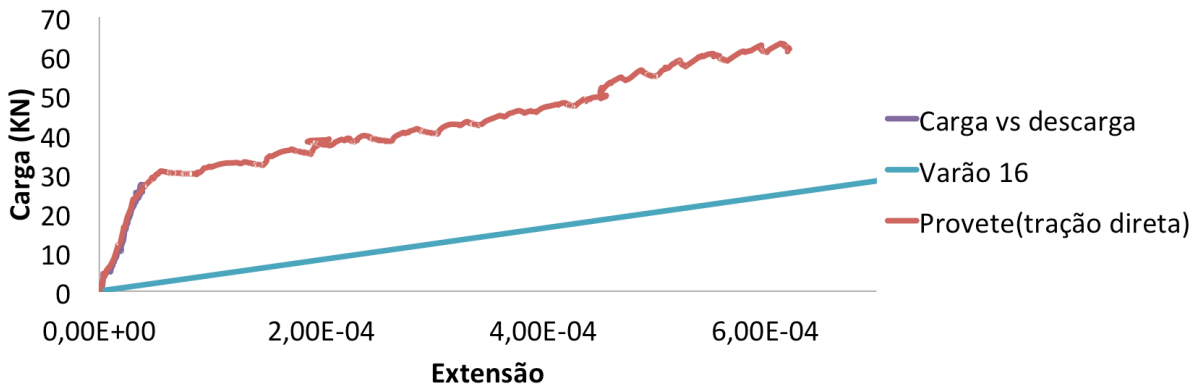


Figura 4.58- Resultado do ensaio de tração direta

Observando a Figura 4.58, é possível reparar que as medições resultantes do ensaio são perfeitamente coerentes, visto a sobreposição das curvas do ensaio de tração direta e o ensaio adicional, realizado inicialmente. O ensaio de tração direta mostrou que o betão atingiu a sua resistência à tração, aproximadamente, aos $30kN$, correspondendo a uma tensão instalada de $2,68MPa$, estando que este valor, embora inesperado, se encaixa perfeitamente para a resistência à tração dos betões que se encontram nas normas. Ao nível das extensões, verificou-se que o betão atingiu a fissuração para uma extensão de, sensivelmente, $0,628 \times 10^{-4}$. Sendo um valor também plausível tendo em conta que o início da fissuração de um betão regular, normalmente, é de $0,800 \times 10^{-4}$. No gráfico da Figura 4.58 foi desenhado a curva que traduz o comportamento de um varão $\phi 16$ isolado, de forma a poder ser comparado o seu desempenho com o provete de betão armado, notando-se claramente um nível de carga bastante mais elevado do provete e após ser atingido a fissuração as duas curvas tendem para declives substancialmente idênticos.

Apesar de o ensaio atingir pouco mais de $60kN$, não foi possível alcançar o ponto de plastificação da armadura, pois por questões de segurança decidiu-se concluir o ensaio quando o provete atingisse a fissuração, cumprindo o objetivo principal que seria alcançar este fenómeno com o sistema de aperto.

Adicionalmente, seria pretendido, no contexto desta dissertação, comparar os resultados obtidos com os resultados teóricos que se encontram datados em normas, tais como, o CEN (2004a) e o *fib* Model Code (2010). Devido às particularidades do betão, à sua difícil caracterização e aos acontecimentos relacionados com a logística do laboratório, os objetivos iniciais, ao nível da abertura e distância entre fendas, não foram contabilizados, dando-se

desta forma o encerramento deste capítulo que ilustra a competência que o sistema desenvolvido pode ter em ensaios de restrição ativa à deformação.

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusões gerais

O estudo do comportamento do betão sob condições de retração restringida tem sido efetuado com recurso a sistemas de restrição ativa à deformação do mesmo. No entanto, os sistemas tradicionalmente utilizados recorrem a dispositivos controlo de elevada precisão e, como tal, tornam-se bastante dispendiosos. Na Universidade do Minho, foi criado um sistema de ensaio de baixo custo, utilizado no estudo dos efeitos da retração impedida, desenvolvido por De Sousa (2011), denominado por *VRF*. Com base nas limitações identificadas ao sistema *VRF* existente, a presente dissertação teve como objetivo principal contribuir para melhoramentos de robustez e desempenho do *VRF*, tendo em vista a condução de ensaios de longo prazo aplicados a betão reforçado com armadura convencional e fibras.

No que toca às alterações e melhoramentos introduzidos ao *VRF*, relevam-se as seguintes conclusões principais:

- Foi possível resolver as dificuldades relacionadas com a geometria do provete, através da criação de um novo molde de fácil desmontagem. Com este novo molde torna-se possível a realização de provetes com geometria bem conhecida e garantias adequadas de paralelismo entre as extremidades do provete.
- Foram identificados problemas ao nível do sistema atuador hidráulico, que por perder carga, necessitava de intervenções, em intervalos de tempo bastante curtos, por parte do operador. Após de uma aprofundada revisão ao sistema, considerou-se que o mesmo estava a perder carga devido à deficiência dos vedantes internos, sendo, portanto, retificado pela empresa vendedora. O cilindro retificado e a substituição das mangueiras e da bomba hidráulica, permitiu melhorar, consideravelmente, o desempenho do atuador.
- Foi criado um sistema de suporte de LVDTs, dispensando a utilização dos materiais usados na colagem das peças necessárias (cola quente e betume poliéster). Este novo sistema tem a particularidade de eliminar as deformações provocadas pelo tempo de cura dos materiais anteriores, que poderiam conduzir a medições erráticas, proporcionando medições bastante mais precisas e coerentes.

Perante as alterações executadas ao VRF não se conseguiu conduzir um ensaio de restrição ativa à deformação que atestasse totalmente a viabilidade do mesmo.

Ao sistema *VRF* preparado para ensaios sobre provetes de betão armado, foi também desenvolvido um sistema de ensaio análogo que permitisse a implementação de vários ensaios em paralelo com custos controlados, com aplicação a provetes com armadura convencional centrada. Para tal, foram estudadas diversas alternativas para a conceção de um novo atuador de carga, entres os quais um sistema hidráulico, um sistema com a inclusão de molas, um de engrenagens e ainda um outro por aperto de uma simples ligação parafuso/porca. O atuador é um dos dispositivos que maior custo acarreta, como tal, as opções estudadas surgem com o propósito de minorar as quantias a ele associadas, sendo utilizada como primeira alternativa o atuador resultante da ligação parafuso/porca, cujos custos associados são bastante reduzidos. Conforme os ensaios realizados no decorrer desta dissertação a este atuador é possível comprovar a sua viabilidade. De seguida, foi concebido um sistema de medição das deformações inspirado no sistema de suporte de LVDTs, desenvolvido para a versão *VRF*, com a particularidade de ser captada a distância relativa entre dois pontos através de um microscópio USB. Todavia, o método de medição utilizado para o tratamento das imagens captadas não foi totalmente validado. Além do atuador e do sistema de medição de deformações, ainda foi possível reduzir os custos associados à aquisição de célula de carga, através da utilização de um extensómetro (que mede as deformações num varão). A relação entre os dados fornecidos por este e a área da secção transversal do varão, em que o extensómetro é colocado, permitem conhecer a carga aplicada no sistema. A execução de um ensaio de restrição ativa com o recente sistema de ensaio preencheu os requisitos básicos comumente observados. Porém, não foi possível apurar a verdadeira influência das armaduras utilizadas no que se refere ao estudo da fissuração devido à retração. O ensaio de restrição à deformação realizado não permitiu atingir a fissuração do provete, como tal, considerou-se oportuna a condução dum ensaio adicional, de tração direta, que alcançasse o fenómeno pretendido através do aperto da ligação parafuso/porca. Este ensaio correspondeu aos resultados esperados, sendo desta forma possível mostrar a capacidade de carga que é possível atingir com o atuador de aperto manual.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Perante as tarefas realizadas nesta dissertação, será necessária a condução de diversos ensaios para a total validação de diferentes factos. No que toca ao sistema de ensaio *VRF*, desenvolvido por De Sousa (2011), será indispensável a condução de um ensaio de restrição ativa quer ensaiando um provete do betão simples, quer no ensaio de um provete de betão armado, para a aprovação da viabilidade do mesmo quando utilizado em ensaios de longo prazo.

O novo sistema de ensaio, que surge com o objetivo de ser operado em paralelo com o *VRF*, necessitará de melhoramentos no que toca ao método utilizado no tratamento das imagens captadas pelo microscópio USB. Pretende-se com o novo melhoramento, proporcionar medições de deslocamentos, entre ciclos de carregamento, com um nível de precisão superior, dispensando o uso em simultâneo de LVDTs. O melhoramento em causa encontra-se, detalhadamente, explicado no final do Capítulo 4.2.2.

Depois de cumpridas as sugestões apresentadas nos parágrafos anteriores, seria de grande utilidade a concretização de um ensaio em simultâneo com os dois sistemas de ensaio: *VRF* para betão armado e o novo sistema de ensaio com atuador de aperto manual sobre dois provetes com as mesmas características mecânicas e condições de cura, para a comparação/aprovação final dos dois sistemas.

Adicionalmente, para conclusão do tema desta dissertação, seria conveniente o planeamento de uma campanha experimental abrangente, que englobasse diversas densidades de armaduras convencionais e fibras discretas, tendo em linha de conta o estudo pormenorizado do comportamento das estruturas restringidas no controlo da fissuração. O estudo proposto englobaria ainda a conjugação/comparação com os resultados previstos, gerados pelos códigos utilizados correntemente, como o CEN (2004a) e o *fib* Model Code (2010).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRISHAMI, H. H. e MITCHELL, D. 1997. Influence of steel fibres on tension stiffening. *ACI Structural Journal*, 94, 769-775.
- ACI COMMITTEE 544 2009. Report on fibre reinforced concrete. *ACI 544.1R-96*. American Concrete Institute.
- ALTOUBAT, S. A. e LANGE, D. A. 2001. Early-age stresses and creep-shrinkage interaction of restrained concrete. Federal Aviation Administration.
- ALTOUBAT, S. A. e LANGE, D. A. 2002. Grip-specimen interaction in uniaxial restrained test. *Concrete: Materials Science to Applications*, ACI SP-206, 189-204.
- ALY, T. e SANJAYAN, J. G. 2010. Shrinkage-cracking behavior of OPC-fiber concrete at early-age. *Materials and Structures*, 43, 755-764.
- ALY, T., SANJAYAN, J. G. e COLLINS, F. 2008. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. *Materials and Structures*, 41, 1741-1753.
- ATRUSHI, D. S. 2003. *Tensile and compressive creep of early age concrete: Testing and modeling*. PhD, Norwegian University of Science and Technology.
- BISCHOFF, P. H. 2003. Tension stiffening and cracking of steel fibre-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2), 174-182.
- BJØNTEGAARD, Ø., KANSTAD, T., SELLEVOLD, E. e HAMMER, T. A. 1999. Stress-inducing deformation and mechanical properties of concrete at early ages. *Utilization of High-Strength/High Performance Concrete Technology*. Sandefjord, Norway: Proc 5th Int. Symposium.
- BLOOM, R. e BENTUR, A. 1993. Restrained shrinkage in high strength concrete. *Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete*. Lillehammer, Norway.
- BOULAY, C., STAQUET, S., DELSAUTE, B., CARETTE, J., CRESPINI, M., YAZOGHLI-MARZOUK, O., MERLIOT, E. e RAMANICH, S. 2013. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since early age? *Material and Structures*.
- BUDYNAS, R. G. e NISBETT, J. K. 2006. *Shigley's Mechanical Engineering Design*.
- CEN 2004a. EN 1992-1-1. European Standard Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: general rules and rules for buildings.
- CHARRON, J.-P., BISSONNETTE, B., MARCHAND, J. e PIGEON, M. 2004. Test device for studying the early-age stresses and strains in concrete.
- CUSSON, D. e HOOGEVEEN, T. 2006. An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 37, 200-209.
- DARQUENNES, A., STAQUET, S., DELPLANCKE-OGLETREE, M.-P. e ESPION, B. 2010. Effect of autogenous deformation on the cracking risk of slag cement concretes. *Cement and Concrete Composites*.
- DE SOUSA, C. 2011. *Concrete behaviour under restrained shrinkage: Proposal of a new test setup*. MSc Thesis, University of Minho.
- DE SOUSA, C. 2013. *Cracking evaluation in fibre reinforced concrete: applied loads and self-induced deformations*. PhD Work Plan, University of Minho.
- FIB MODEL CODE 2010. *fib Model Code 2010*. International Federation for Structural Concrete (fib), prepared by fib Special Activity Group 5, based on the draft published as *fib Bulletins 55 and 56*.

- HAMMER, T. A. 2007. *Deformations, strain capacity and cracking of concrete in plastic and early hardening phases*. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology - Faculty of Engineering.
- HENGJING, B. A., ANSHUANG, S. U., XIAOJIAN, G. A. O. e QI, T. A. O. 2008. Cracking tendency of restrained concrete at early ages. *Journal of Wuhan University of Technology*, 23(2), 263-267.
- KAMEN, A., DENARIÉ, E., SADOUKI, H. e BRUHWILER, E. 2008. Thermo-mechanical response of UHPFRC at early age: Experimental study and numerical simulation. *Cement and Concrete Research*, 38, 822-831.
- KOVLER, K. 1994. Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and Structures*, 27, 324-330.
- LIN, Z., KISHI, T. e LIM, S. 2008. Experimental evaluation of early-age creep by a temperature-stress testing machine. *The 3rd ACF International conference-ACF/VCA*.
- LURA, P., VAN BREUGEL, K. e MARUYAMA, I. 2001. Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 1867-1872.
- NETO, A., CINCOTTO, M. A. e REPETTE, W. L. 2007. Development of methods and equipment for measuring restraint shrinkage. (in Portuguese). Polytechnic School of the University of São Paulo.
- PAILLÈRE, A.-M. e SERRANO, J.-J. 1976. Apparatus for the study of concrete cracking (in French). *Bull. Liaison Labo. P. et Ch.*, 83, 29-38.
- PAILLÈRE, A. M., BUIL, M. e SERRANO, J. J. 1989. Effect of fiber addition on the autogeneous shrinkage of silica fume concrete. *ACI Materials Journal*, 86-M13, 139-144.
- PIGEON, M., TOMA, G., DELAGRAVE, A., MARCHAND, J., BISSONNETTE, B. e PRINCE, J. C. 2000. Equipment for the analysis of the behaviour of concrete under restrained shrinkage at early ages. *Magazine of Concrete Research*.
- SILVA, N. G. 2011. *Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica*. PhD, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SPRINGENSCHMID, R., BREITENBÜCHER, R. e MANGOLD, M. 1994. Development of the cracking frame and the temperature stress testing machine. In: SPRINGENSCHMID, R. (ed.) *Thermal Cracking at Early Ages*. RILEM, E&FN SPON.
- SULE, M. e BREUGEL, K. 2001. Cracking behaviour of reinforced concrete subjected to early-age shrinkage. *Materials and Structures*, 34.
- SUN-GYU, P., MARUYAMA, I., JEONG-JIN, K. e NOGUCHI, T. 2003. Mechanical properties of expansive high-strength concrete under simulate-completely restrained condition at early age. *The Ninth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*.
- TAO, Z. e WEIZU, Q. 2006. Tensile creep due to restraining stresses in high-strength concrete at early ages. *Cement and Concrete Composites*, 36, 584-591.
- TEIXEIRA, L., LEITÃO, L., FARIA, R. e AZENHA, M. 2012. Ensaio de restrição axial controlada para caracterização do betão tracionado devido à retração.
- VEIGA, M. R. S. 1997. *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes - contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. PhD, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

7 ANEXOS

7.1 Dedução da expressão desenvolvida por Cusson e Hoogeveen (2006)

Nesta secção será apresentada uma análise explicativa da Eq. 2.6 desenvolvida por Cusson e Hoogeveen (2006), para o cálculo da tensão no betão ao longo de um ensaio de restrição ativa à deformação em provetes com armadura longitudinal. A tensão no betão é calculada através da medição da extensão elástica ao longo do ensaio.

Para a dedução da expressão é necessário compreender os efeitos que ocorrem durante um ensaio de restrição ativa, entre os quais a retração, temperatura e a solicitação imposta. Tendo em conta estes efeitos e as respetivas repercussões/deformações ao longo do ensaio de forma independente, é possível sobrepor os mesmos e conhecer as deformações na globalidade. É através das deformações globais que é possível determinar as tensões no betão.

Posto isto, será executado um estudo faseado admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos entre o betão e o aço, para o conhecimento das variações volumétricas resultantes de cada efeito.

- Evolução da retração

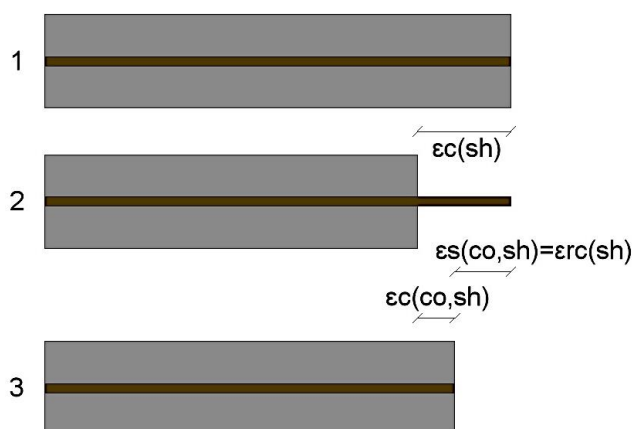


Figura 7.1- Efeito da evolução da retração

Tabela 7.1- Extensões resultantes da evolução da retração

$\varepsilon_{c(sh)}$	Extensão do betão no caso de retrair livremente
$\varepsilon_{s(co,sh)}$	Extensão do aço admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos com o betão
$\varepsilon_{c(co,sh)}$	Extensão do betão admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos com o aço
$\varepsilon_{rc(sh)}$	Extensão medida durante o ensaio no provete restrito de se deformar devido à evolução da retração

Pela análise da Figura 7.1 e da Tabela 7.1, retira-se que o caso 1 corresponde ao provete na sua posição inicial, coincidindo com o início do ensaio, nesta fase o provete ainda não retraiu. O caso 2 demonstra a deformação do betão devido à retração, admitindo que o aço e o betão não se encontram ligados, daí o betão retrair livremente. O caso 3 representa a situação real, isto é, o betão e o aço encontram-se em compatibilidade de esforços e deslocamentos, como tal, o betão retrai e o aço impede que o este atinja determinado limite de deformação, sendo este limite coincidente com o caso 2 (retração livre). A única variável conhecida durante o ensaio é a que se encontra representada na figura com a sigla $\varepsilon_{rc(sh)}$. Assim, admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos (caso 3), a resultante de esforços no aço e no betão é nula:

$$N_c + N_s = 0 \quad \text{Eq. 7.1}$$

$$N_c = -N_s \quad \text{Eq. 7.2}$$

$$\sigma_c A_c = -\sigma_s A_s \quad \text{Eq. 7.3}$$

Sabendo que:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{Eq. 7.4}$$

Assim, é possível retirar a tensão no betão, σ_c , conhecendo a extensão no aço, $\varepsilon_{s(co,sh)}$, sabendo que esta é coincidente com a extensão medida no provete restrito ao longo do ensaio devido à retração, $\varepsilon_{rc(sh)}$:

$$\sigma_c = - \frac{E_s \varepsilon_{rc}(sh) A_s}{A_c} \quad \text{Eq. 7.5}$$

A expressão anterior representa a tensão no betão, partindo do princípio que o betão e o aço se encontram completamente associados.

- Variação da temperatura

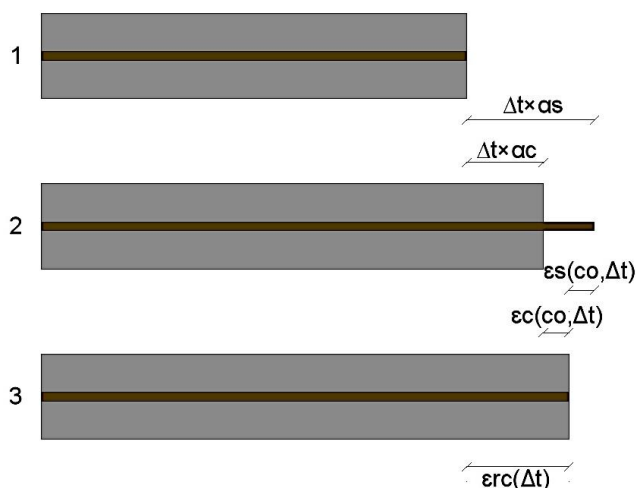


Figura 7.2- Efeito da variação da temperatura

Tabela 7.2- Extensões resultantes da variação da temperatura

$\Delta t \times \alpha_s$	Extensão do aço provocada pela variação da temperatura
$\Delta t \times \alpha_c$	Extensão do betão provocada pela variação da temperatura
$\varepsilon_s(co, \Delta t)$	Extensão do aço admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos com o betão
$\varepsilon_c(co, \Delta t)$	Extensão do betão admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos com o aço
$\varepsilon_{rc}(\Delta t)$	Extensão medida durante o ensaio no provete restrito de se deformar devido à variação de temperatura

Pela observação da Figura 7.2 e da Tabela 7.2, verifica-se que o caso 1 corresponde ao provete na sua posição inicial, coincidindo com o início do ensaio, nesta fase o provete ainda não sofreu deformações relativas à variação da temperatura. O caso 2 demonstra as deformações do betão e do aço, admitindo não existir ligação entre os mesmos, como tal resultam deslocamentos distintos. O caso 3 representa a situação real, isto é, o betão e o aço entram-se em compatibilidade de esforços e deslocamentos, por isso, o betão atinge uma deformação superior relativamente ao caso 2 dada a interação existente com a armadura. Por outro lado, verifica-se um encurtamento da deformação do aço em relação ao caso 2, cuja deformação é proporcionada devido à solidarização com o betão. Num ensaio típico as variáveis conhecidas são Δt , a temperatura, e $\varepsilon_{rc(\Delta t)}$, a extensão medida durante o mesmo. Desta feita, admitindo a compatibilidade de esforços e deslocamentos (caso 3), a resultante de esforços no aço e no betão é nula:

$$N_c + N_s = 0 \quad \text{Eq. 7.6}$$

$$N_c = -N_s \quad \text{Eq. 7.7}$$

$$\sigma_c A_c = -\sigma_s A_s \quad \text{Eq. 7.8}$$

Sabendo que:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{Eq. 7.9}$$

É possível nesta fase conhecer a tensão no betão:

$$\sigma_c = -\frac{E_s \varepsilon_{s(co,\Delta t)} A_s}{A_c} \quad \text{Eq. 7.10}$$

Contudo, como já referido, $\varepsilon_{s(co,\Delta t)}$ é uma variável desconhecida, durante o ensaio, e por isso é necessário relacionar com $\varepsilon_{rc(\Delta t)}$. Através da figura retira-se que:

$$\varepsilon_{s(co,\Delta t)} = \varepsilon_{rc(\Delta t)} - \Delta t \times \alpha_s \quad \text{Eq. 7.11}$$

Finalmente, conclui-se que a tensão no betão é dada por:

$$\sigma_c = - \frac{E_s(\varepsilon_{rc}(\Delta t) - \Delta t \times \alpha_s)A_s}{A_c} \quad \text{Eq. 7.12}$$

A expressão anterior representa a tensão no betão devido ao efeito da temperatura, considerando a aderência total entre o betão e o aço.

- Solicitação imposta pelo atuador



Figura 7.3- Efeito da solicitação imposta pelo atuador

Tabela 7.3- Extensões resultantes da aplicação de carga

$\varepsilon_s(p)$	Extensão do aço provocada pela aplicação de carga
$\varepsilon_c(p)$	Extensão do betão provocada pela aplicação de carga
$\varepsilon_{rc}(p)$	Extensão medida durante o ensaio no provete restrito de se deformar devido à aplicação de carga

Com base na Figura 7.3 e na Tabela 7.3, o caso 1 corresponde, numa situação real, ao instante anterior à aplicação de carga com o fim de recuperar o comprimento inicial do provete. O caso 2 corresponde ao instante após a aplicação de carga ao provete, sendo a extensão $\varepsilon_{rc}(p)$ uma variável conhecida ao longo do ensaio. Para que o betão e a armadura se deformem de igual forma, é necessária a compatibilidade total entre os mesmos. Para tal o esforço aplicado terá uma componente no aço e uma no betão:

$$P(t) = N_c + N_s \quad \text{Eq. 7.13}$$

Sabendo que:

$$\sigma = E\varepsilon = \frac{N}{A} \rightarrow N = E\varepsilon A \quad \text{Eq. 7.14}$$

Substituindo:

$$P(t) = \sigma_c A_c + E_s \varepsilon_{rc(p)} A_s$$

Simplificando a expressão:

$$\sigma_c = \frac{-E_s \varepsilon_{rc(p)} A_s + P(t)}{A_c} \quad \text{Eq. 7.15}$$

Concluída a primeira etapa, estudo faseado para compreensão das repercussões/deslocamentos resultantes de cada efeito, é possível executar a sobreposição dos mesmos. A extensão total medida durante o ensaio, no provete restrito, é dada pelo somatório das componentes de retração, temperatura e carga aplicada, ou seja:

$$\varepsilon_{rc(total)} = \varepsilon_{rc(sh)} + \varepsilon_{rc(\Delta t)} + \varepsilon_{rc(p)} \quad \text{Eq. 7.16}$$

Assim, é possível retirar a tensão total durante um ensaio de restrição ativa à deformação:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= -\frac{E_s \varepsilon_{rc(sh)} A_s}{A_c} - \frac{E_s (\varepsilon_{rc(\Delta t)} - \Delta t \times \alpha_s) A_s}{A_c} - \frac{E_s \varepsilon_{rc(p)} A_s - P(t)}{A_c} \\ \sigma_c &= -\frac{E_s A_s}{A_c} (\varepsilon_{rc(sh)} + \varepsilon_{rc(\Delta t)} + \varepsilon_{rc(p)} - \Delta t \times \alpha_s) + \frac{P(t)}{A_c} \end{aligned}$$

Simplificando a expressão é alcançada a Eq. 2.6 desenvolvida por Cusson e Hoogveen (2006):

$$\sigma_c = \frac{\alpha_s \Delta T(t) E_s A_s + P(t) - \varepsilon_{tot}(t) E_s A_s}{A_c}$$

7.2 Dedução da expressão utilizada para o cálculo do esforço axial através da deformação

Nesta secção será elaborada a dedução da Eq. 3.23 utilizada no Capítulo 3 para o cálculo do esforço axial devido à aplicação de determinado deslocamento.

No exemplo apresentado na figura tal, o provete é composto por três partes, isto é, a secção do provete de betão armado e duas secções formadas pela continuação do varão quer superiormente quer inferiormente ao provete. Como tal, a deformação total é dividida nas três partes enunciadas:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{s,sup} + \varepsilon_{rc} + \varepsilon_{s,inf} \quad \text{Eq. 7.17}$$

Sabendo que:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \varepsilon E \quad \text{Eq. 7.18}$$

E que:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Eq. 7.19}$$

É possível chegar à seguinte relação:

$$\Delta L = \frac{NL}{EA} \quad \text{Eq. 7.20}$$

Se a expressão anterior for aplicada a cada secção do provete como foi atrás dividido o sistema total:

$$\Delta L = \frac{NL_{s,sup}}{E_s A_s} + \frac{NL_{rc}}{E_c \bar{A}_c} + \frac{NL_{s,inf}}{E_s A_s} \quad \text{Eq. 7.21}$$

Sabendo que:

$$\bar{A}_c = A_c + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1\right) A_s \quad \text{Eq. 7.22}$$

É possível simplificar a expressão, como se encontra exemplificado a seguir, chegando à Eq. 3.23:

$$\Delta L = N \left(\frac{L_{s,sup}}{E_s A_s} + \frac{L_{rc}}{E_c \left(A_c + \left(\frac{E_s}{E_c} - 1 \right) A_s \right)} + \frac{L_{s,inf}}{E_s A_s} \right)$$