



2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de novembro de 2016

ENSAIOS DE FLUÊNCIA EM TRAÇÃO MÉTODO DE ENSAIO

Gil Jeurissen Rosa

Licenciado, LNEC-ISEL, Lisboa, grosa@lnec.pt

Maria Sofia Sousa Ribeiro

Engª Civil, LNEC, Lisboa, sribeiro@lnec.pt

Sérgio Oliveira

Engº. Civil, LNEC, Lisboa, soliveira@lnec.pt

Resumo

É reconhecida a importância do aprofundamento dos conhecimentos sobre a fluência em tração do betão, atendendo à variedade de aspetos apresentados por este mecanismo e por poder influenciar a fissuração do betão.

O betão é um material que apresenta uma rotura frágil e é muito suscetível a fissurações. A sua baixa capacidade de deformação e baixa resistência à tração têm uma influência negativa no tempo de vida das estruturas de betão. Por este motivo, entre outros, não se podem negligenciar as propriedades em tração do betão para o dimensionamento de estruturas, nomeadamente os efeitos do tempo na rotura por tração.

O presente artigo pretende descrever o ensaio de determinação da fluência em tração do betão que se encontra em fase de implementação no LNEC. Com base em campanhas experimentais, indicam-se os principais aspetos a considerar para a preparação dos provetes de ensaio e na avaliação dos resultados.

Palavras-chave: Fluência em tração, Tensão de tração; Betão, Ensaio; Deformações

Introdução

No controlo da segurança de estruturas de betão, como é o caso, por exemplo, das pontes em betão ou das grandes barragens, é fundamental analisar o seu comportamento ao longo do tempo. Para tal é necessário observar a evolução ao longo do tempo do campo de deslocamentos das obras e proceder à sua análise, tendo em conta:

- i) a variação ao longo do tempo das principais solicitações;
- ii) o eventual aparecimento e progressão ao longo do tempo de fendas ou de zonas fendilhadas;
- iii) a eventual ocorrência de ações excecionais, de carácter evolutivo ou localizadas no tempo; e, por fim,
- iv) o comportamento diferido do betão (comportamento viscoelástico), caracterizado geralmente pela respetiva lei de fluência, cujos parâmetros importa conhecer.

O conhecimento da lei de fluência do betão de uma dada obra é fundamental para que, a partir dos dados da observação da obra, seja possível identificar o desenvolvimento de eventuais patologias: de facto a evolução ao longo do tempo dos deslocamentos totais observados numa obra incluem, em geral, uma parcela não patológica correspondente à resposta elástica e de fluência associada à história das principais forças aplicadas e uma parcela patológica a qual poderá estar associada, por exemplo, ao desenvolvimento de processos expansivos, ao aparecimento e progressão de fendas, a movimentos de fundação, etc. Sob o ponto de vista do controlo da segurança é fundamental conseguir distinguir as duas referidas parcelas dos efeitos do tempo (patológica e não patológica) o que só é possível quando se conhece devidamente a lei de fluência do betão.

Assim, compreende-se bem o interesse de obter uma boa caracterização experimental da deformabilidade diferida do betão o que se consegue através da realização de ensaios de fluência em laboratório, e, por vezes, recorrendo a células de fluência instaladas em obra. A referida caracterização experimental do comportamento diferido do betão é usualmente efetuada com base em ensaios de fluência à compressão o que se justifica na medida em que o betão estrutural é utilizado para funcionar essencialmente em compressão (como se sabe a resistência do betão à compressão é cerca de 10 vezes maior que a sua resistência à tração).

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de metodologias para a realização de ensaios laboratoriais de fluência em tração direta, em provetes de betão.

Neste trabalho sobre a caracterização experimental do comportamento diferido do betão com base em ensaios de tração direta, visa-se contribuir não apenas para o desenvolvimento de metodologias para o estudo experimental da fluência em regime viscoelástico linear (fluência primária, que ocorre para tensões aplicadas inferiores a 40% da tensão de rotura à tração), mas também para o estudo experimental da fluência secundária e terciária (com rotura por tração devido a aumento de extensões por fluência), que ocorre para tensões aplicadas de valor elevado, normalmente entre 70% e 90% da tensão de rotura à tração (f_t).

Metodologia

A realização destes ensaios de fluência em tração em provetes de betão envolveu de modo geral as seguintes questões:

- i) projeto e construção dos equipamentos do tipo alavanca;
- ii) calibração dos equipamentos de medição de força e deslocamento;
- iii) composição do betão de ensaio e moldagem dos provetes;
- iv) colocação dos provetes do tipo *bone shaped* em ensaio e aquisição dos dados;
- v) análise do campo de tensões em provetes *bone shaped* utilizando um programa elementos finitos 3D (desenvolvido em MATLAB);
- vi) ensaios complementares ao ensaio de fluência em tração.

Equipamentos para ensaio de fluência em tração

O projeto e conceção dos equipamentos para ensaio de fluência em tração resultou num sistema do tipo alavanca (sistema de seis alavancas) conforme se observa na Figura 1. A aplicação da força de tração sobre o provete de ensaio resulta da aplicação de força de compressão numa almofada hidráulica de periferia toroidal ao meio de uma viga rotulada na extremidade oposta ao provete.



Figura 1: Sistema de alavancas para ensaios de fluência em tração de provetes de betão [Oliveira, 2002; Emílio et al. 2007]

Tanto a viga superior como a base da estrutura estão sujeitas ao mesmo tipo de ações, predominantemente flexão e esforço transversal, tendo-se considerado que um tubo de aço de secção retangular seria uma boa solução, adotou-se um perfil tubular de secção 250x150x5 mm³ em aço S355 laminado a quente. Considerou-se que a força a aplicar pela almofada é no máximo de 200 kN, resultando em forças de 100 kN nas extremidades da viga.

As ações de tração são transmitidas ao provete por colagem de placas de aço nos topos. A operação de colagem envolve algumas delicadezas, por isso têm-se placas específicas para este fim, essas placas são posteriormente aparafusadas contra duas outras placas ligadas aos órgãos adjacentes – a célula de força no lado superior; a rótula esférica no lado inferior. A força de tração é aplicada através de um sistema de rótula esférica (rotulado nos três planos), localizado antes das placas, que permite que não se transmita momento fletor ou de torção.

Para manter a carga aproximadamente constante ao longo do tempo recorreu-se a um circuito óleo-hidráulico incluindo um acumulador com interface óleo-gás (azoto), observado na Figura 2.



Figura 2: Acumulador com interface óleo-gás, manómetro e válvulas do circuito óleo-hidráulico.

Calibração transdutores de força e de deslocamento

A calibração dos transdutores de força recorreu à montagem em série do padrão e célula de carga (Figura 3), e a calibração dos transdutores de deslocamento do tipo *LVDT* realizou-se por recurso a um interferómetro laser e sistema de imposição de deslocamento. Os transdutores de força foram calibrados em toda a gama de medição (0 a 100kN, em tração), assim como os *LVDT*'s calibrados para valores de -2,5 mm a +2,5 mm.



Figura 3: Calibração dos transdutores de força.

Moldagem dos provetes de betão para ensaio de fluência em tração

A determinação da composição do betão foi realizada tendo-se definido que os ensaios deveriam ser realizados para um betão de baixa resistência mecânica de resistência à compressão de 20 MPa.

Para a moldagem dos provetes de betão construíram-se moldes em contraplacado marítimo e pinho conforme Figura 4, note-se que os pernos não atravessam o provete. A moldagem dos provetes é realizada na vertical, como se observa na Figura 5.



Figura 4: Molde de madeira para moldagem de provete do tipo *bone shaped* e pormenor do tipo de pernos para colocação dos *LVDT*'s.



Figura 5: Moldagem de um provete do tipo *bone shaped* para o ensaio de fluência em tração (LNEC-NBPC, maio de 2016).

Colocação dos provetes em ensaio de fluência em tração

A colagem dos provetes de betão às placas de aço para transmissão da força das alavancas foi feita por recurso a uma cola de epóxi.

Durante o ensaio de fluência em tração o sistema eletrónico de aquisição automática de dados (*DataTaker*) foi configurado para uma frequência de amostragem de duas leituras por minuto, armazenadas automaticamente em ficheiros do tipo “*comma separated*”; note-se que esta frequência de amostragem foi adotada com o propósito de se vir a registar a rotura na fase de fluência terciária.

O tratamento dos dados adquiridos na célula de carga e nos *LVDT*'s instalados no provete de controlo (para controlo da extensão de retração ou devida a eventuais variações térmicas na sala de ensaio) e nos provetes em carga foi realizado por recurso a programação em MATLAB. O desenvolvimento de programas em MATLAB teve como objetivo:

- i) “união” de ficheiros de *excel* com leituras de adquiridas durante 3 a 4 dias (8840 medições por provete por dia);
- ii) ajuste pelo MMQ dos parâmetros da lei de fluência da teoria da Solidificação [Bazant 1989] aos dados experimentais.

Análise do campo de tensões em provetes *bone shaped* utilizando um programa elementos finitos 3D desenvolvido em MATLAB

Realizaram-se estudos em modelos numéricos de elementos finitos EF3D para definição das formas mais adequadas dos provetes do tipo *bone shaped*. O tipo de geometria utilizado neste trabalho está representado na Figura 6.

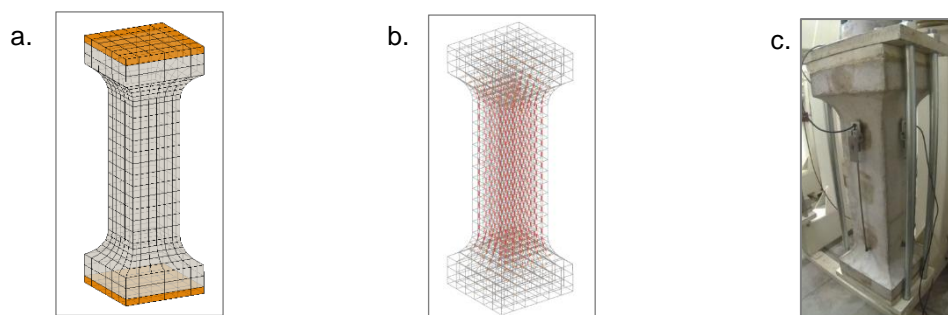


Figura 6: a. Malha de elementos finitos para estudo numérico do campo de tensões, por recurso ao MATLAB. b. Malha 3D de elementos finitos e campo de tensões. Provede tipo *bone shaped* instrumentado. Repare-se que apenas são medidas as deformações no troço longitudinal compreendido entre os apoios dos *LVDT*'s, de 400 mm de comprimento.

O programa de cálculo elaborado permitiu a modelação em três dimensões de provetes sujeitos à tração e realizar uma análise dos campos de deslocamentos e de tensões quando sujeitos à força de tração de rotura obtida experimentalmente (Figura 7).

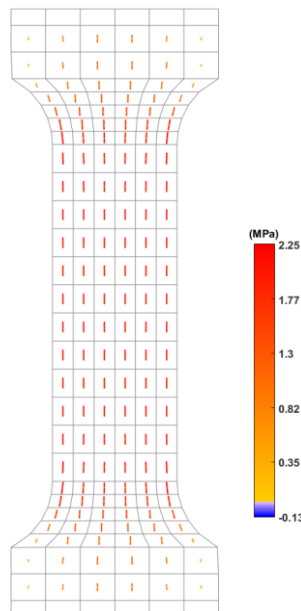


Figura 7: Malha de elementos finitos 3D (tipo cubo de 20 pontos nodais) dos provetes *bone shaped* (curvatura circular acentuada na zona de transição) e campo de tensões principais (tração de 2 MPa na secção central e trações máximas no final da zona de transição de 2.25 MPa).

Ensaio laboratoriais

Ensaio complementares ao ensaio de fluência em tração

Realizou-se a determinação do ensaio de módulo de elasticidade em compressão (Figura 8) foi realizado segundo a norma NP EN 12 390-13:2015, de acordo com o descrito no Método B. Realizou-se o ensaio em provetes de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro, aos 28 dias de idade, e obteve-se um valor médio de 28,8 GPa.

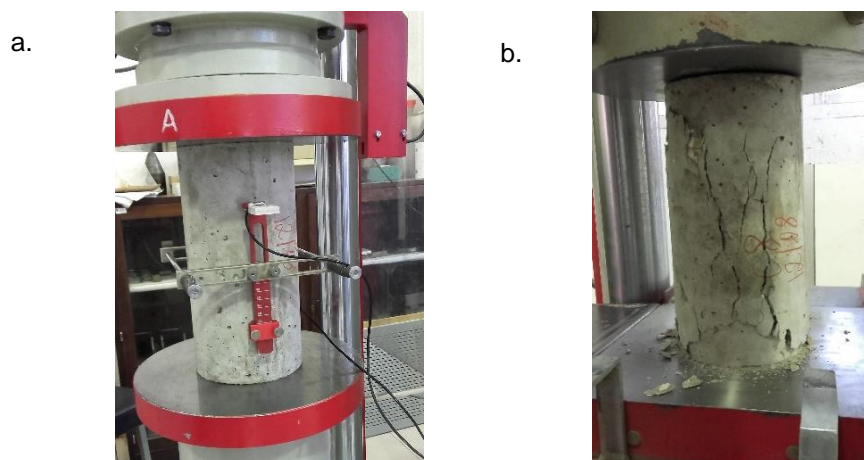


Figura 8: a. Ensaio de módulo de elasticidade em compressão. b. Ensaio de compressão realizado ao provete que serviu para a determinação do módulo de elasticidade.

Realizaram-se ensaios de tração direta em provetes do tipo *bone shaped* para determinação da tensão de rotura (Figura 9).

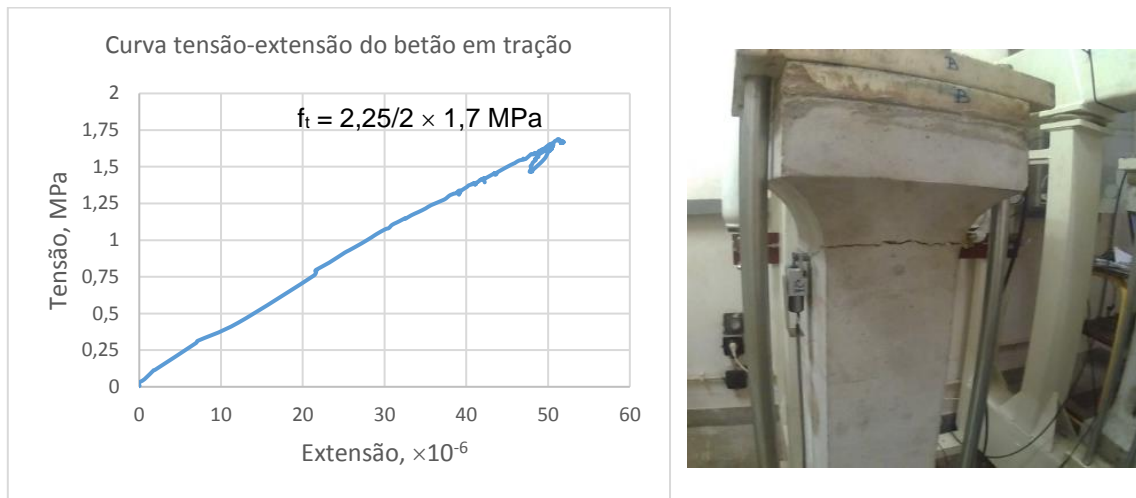


Figura 9: Ensaio de tração direta em provete do tipo *bone shaped*. Relação entre tensões e deformações até à rotura: $f_t = (2,25/2) \times 1,7 \text{ MPa} = 1,91 \text{ MPa}$. Note-se a formação de uma fenda na zona da transição onde são esperadas as maiores tensões de tração que, de acordo com os resultados numéricos MEF3D, obtidos no capítulo anterior, são 2,25/2 vezes superiores à tensão na zona central do provete.

Também se procedeu à determinação da resistência à tração através do ensaio de compressão diametral foi baseada na norma NP EN 12390-6:2011. Realizou-se o ensaio em provetes de 300mm de altura e 150mm de diâmetro, aos 28 dias de idade, e obteve-se um valor médio de 2,02MPa (Figura 10).



Figura 10: Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (antes e após a rotura).

Apresentam-se no Quadro 1 os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios realizados.

Quadro 1: Valores de resistência à tração em função do tipo de provete e ensaio.

Tipo de provete e ensaio	Resistência à tração (MPa)
<i>Bone shaped</i> , ensaio de tração direta	1,91
Cilíndrico, ensaio de compressão diametral	2,02

Considerando a resistência à tração como uma variável aleatória, esta é caracterizada por um desvio padrão relativamente elevado comparativamente ao seu valor médio. Isto obriga a dispor de um número de provetes de ensaio significativamente superior ao número de provetes necessários para os ensaios de compressão.

Na Ensaio de tração em provetes cilíndricos de 300 mm de altura e 150 mm de diâmetro (Figura 11).

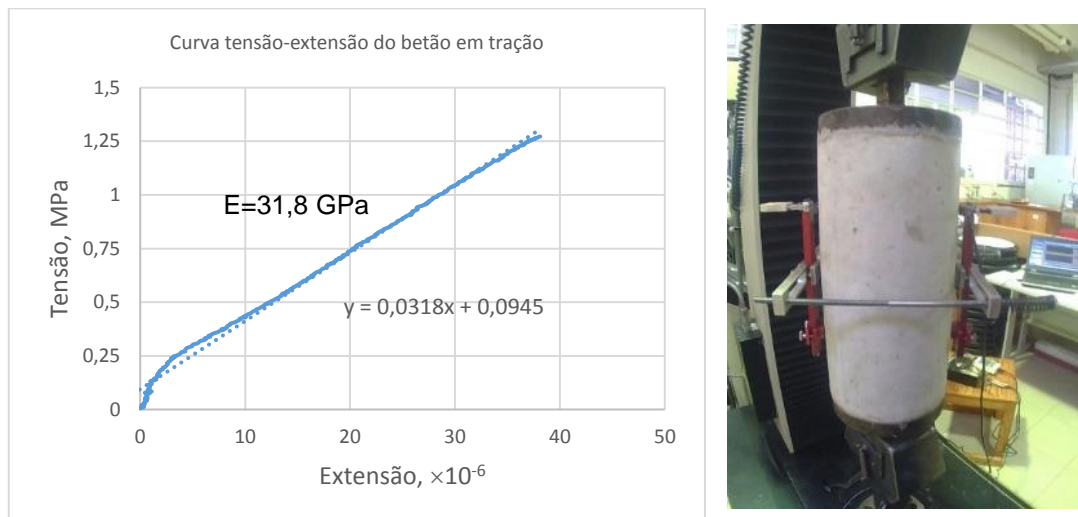


Figura 11: Ensaio de tração em provete cilíndrico de secção constante. Determinação do módulo de elasticidade. Curva tensão-extensão em tração obtido num ensaio sobre um provete cilíndrico de secção constante.

Procedeu-se à determinação do módulo de elasticidade por recurso a ultra-sons [BS 1881-203] aos 28 dias de idade e apresentam-se no Quadro 2 os resultados obtidos.

Quadro 2: Módulo de elasticidade. Valores obtidos em ensaios de ultra-sons (E_{din}) e ensaios mecânicos (E_{mec}). Comparação entre $E_{est} = E_{din} / 1,5$ (valor determinado por ultra-sons) e E_{mec} (valor determinado em ensaios mecânicos).

Tipo de provete e idade	Ultra-sons		Ensaio mecânico E_{mec} (módulo de elasticidade determinado em ensaios mecânicos, GPa)
	E_{din} (módulo de elasticidade dinâmico, GPa)	$E_{est} = E_{din} / 1,5$ (módulo de elasticidade Estático, GPa)	
Cilíndrico	45,9	30,6	28,8 (ensaio de compressão NP EN 12 390)
<i>Bone shaped</i>	44,4	29,6	33,5 (ensaio de tração direta sistema de fluência tração)

Ensaio de fluência em tração

Neste ponto apresentam-se os principais resultados obtidos referentes ao ensaio de fluência em tração, realizados em dois provetes de betão do tipo *bone shaped* com geometria caracterizada por uma zona central de secção uniforme quadrada de 150 mm de lado, submetidos a uma tensão de 1,2 MPa e de 1,3 MPa, respetivamente (Figura 12 e Figura 13), aplicada à idade de 28 dias e mantida constante durante 90 dias (atualmente estes ensaios ainda estão em curso, e pretende-se manter a carga durante

pelo menos 3 anos na expectativa de que em algum destes dois provetes venha a ocorrer rotura por fluência em tração: fluência terciária).

Apresentam-se na Figura 12 e na Figura 13 as funções de fluência à tração ajustadas aos resultados experimentais pelo MMQ dos parâmetros da lei de fluência da teoria da solidificação.

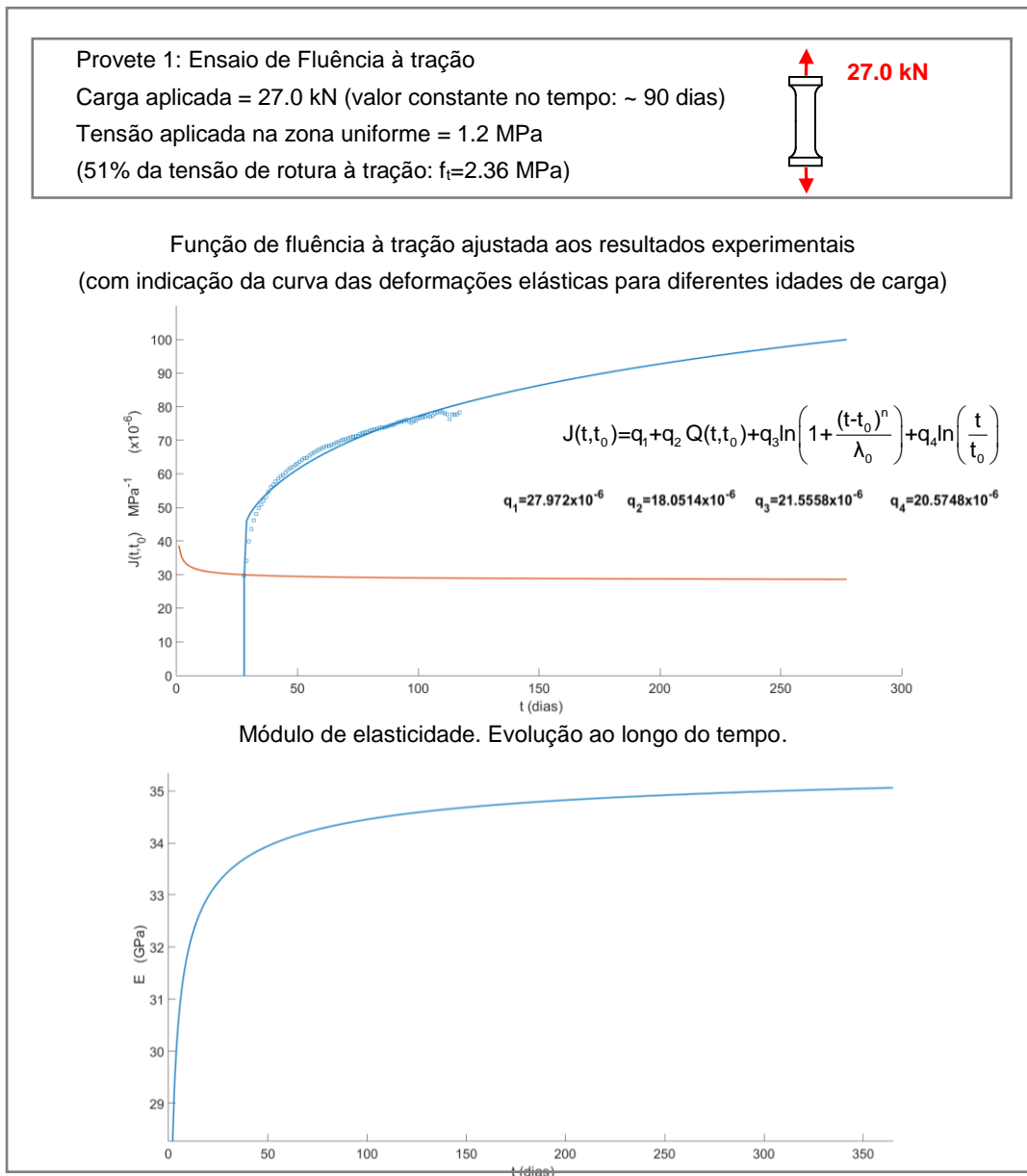


Figura 12: Ajuste da função de fluência da teoria da Solidificação aos resultados experimentais obtidos no ensaio de fluência à tração do provete 1. a) Função de fluência ajustada pelo MMQ, impondo $q_1=1/E_0=0.8/E_{28}$ ($E_{28}=28600$ MPa). b) Evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo.

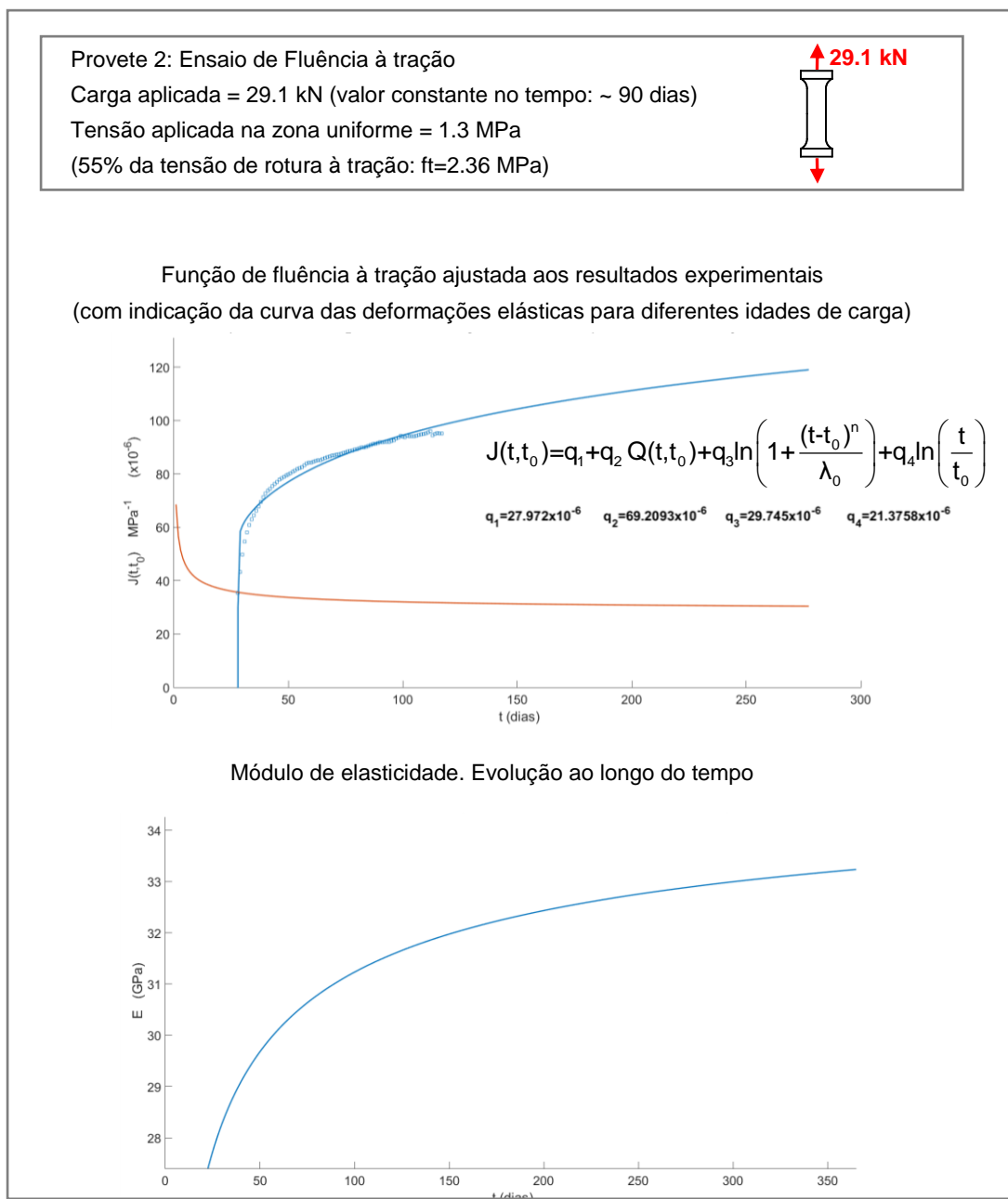


Figura 13: Ajuste da função de fluência da teoria da Solidificação aos resultados experimentais obtidos no ensaio de fluência à tração do provete 1. a) Função de fluência ajustada pelo MMQ, impondo $q_1=1/E_0=0.8/E_{28}$ ($E_{28}=28600$ MPa). b) Evolução do módulo de elasticidade ao longo do tempo.

Com base nos resultados experimentais obtidos nestes dois provetes (já com cerca de 90 dias de carga), apresenta-se o resultado do ajuste pelo MMQ dos parâmetros da lei de fluência da teoria da solidificação. Na Figura 14 tem-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos nos dois provetes em fluência à tração e ainda uma comparação com resultados obtidos em fluência à compressão num provete prismático com a mesma composição e também carregado à idade de 28 dias com uma tensão de compressão de 6,9 MPa.

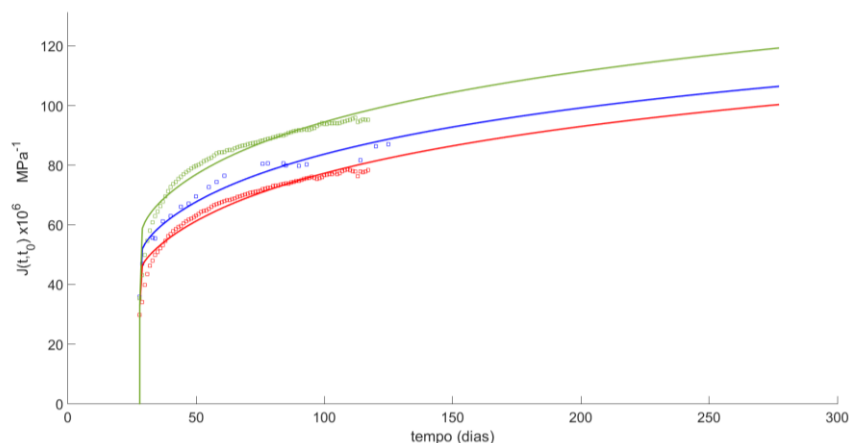


Figura 14: Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de fluência em tração efetuados nos provetes 1 (vermelho) e 2 (verde), com ajuste da função de fluência da teoria da Solidificação impondo o valor de $q_1=1/E_0=0.8/E_{28}$ ($E_{28}=28,6$ GPa). Comparação com o resultado de um ensaio de fluência à compressão (azul) para o mesmo betão (o ensaio em compressão foi efetuado num provete prismático com tensão aplicada de 6,9 MPa).

Conclusões

Com base na metodologia proposta e com base nos aperfeiçoamentos conseguidos ao nível dos equipamentos e *software* para realização de ensaios de fluência em tração perspectiva-se o prosseguimento de um programa de investigação mais completo sobre o comportamento diferido do betão sob tensões de tração. Prevê-se, nomeadamente, a realização de ensaios de fluência em tração em provetes com novas formas geométricas, sob diferentes níveis de tensão e com cargas aplicadas em diferentes idades.

Referências bibliográficas

- BAZANT, Z.P; PRASANNAN, S., 1989 - **Solidification theory for concrete creep. I e II.** Journal of Eng. Mechanics. Vol.115.Paps.23755/6 (pp.1619-1703; pp.1704-1725).
- OLIVEIRA, S., 2002 – **Study of Evolutive Deterioration Processes in Concrete Dams. Safety Control Over Time.** REEQ/815/ECM/2005 In, Projeto PNRC-FCT, LNEC/FEUP (Proc. 0402 / 14 / 15089). (2002-2005 com Relatório Final em 2010).
- RIBEIRO, S., 2015 – **Fluência em tração do betão.** Projeto P2I-LNEC.
- NP EN 12 390-3: 2009 – **Ensaio do betão endurecido; Parte 3: Resistência à compressão de provetes.** Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12 390-13: 2014 – **Ensaio do Betão Endurecido; Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão.** Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- NP EN 12 390-6: 2011 – **Ensaio do betão endurecido; Parte 6: Resistência à tração por compressão de provetes.** Caparica: Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- BS 1881-203: 1986 – **Testing Concrete – Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete.** London: British Standards Institution (BSI).