



2.º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

QIC2016

Lisboa • LNEC • 21 a 23 de novembro de 2016

EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA DE VARÕES DE AÇO ALTERAÇÃO DO MÉTODO DA SUA DETERMINAÇÃO ATRAVÉS DE UM EXTENSÓMETRO

António Manuel Baptista

Doutorado, LNEC, ambaptista@lnec.pt

Ana Sofia Louro

Doutorada, LNEC, analouro@lnec.pt

Ricardo Mendes

Mestre, LNEC, rmendes@lnec.pt

João Filipe

Mestre, LNEC, jfilipe@lnec.pt

Resumo

A extensão total na força máxima, A_{gt} , é uma das características do aço dos varões para betão armado que permite avaliar a sua ductilidade. Esta característica é avaliada através de ensaios de tração de provetes retirados de varões, sendo habitualmente utilizados dois tipos de métodos diferentes para a sua determinação, ambos previstos nos documentos normativos existentes.

Um dos métodos utilizados baseia-se na medição manual da deformação permanente sofrida pelo provete num determinado comprimento de referência. Em alternativa, o valor de A_{gt} pode ser determinado a partir do registo força-deformação, obtido ao longo do ensaio de tração com recurso a um extensómetro colocado sobre o provete.

Porém, é frequente constatar a existência de diferenças muito significativas entre os valores de A_{gt} obtidos através dos dois métodos referidos. Estas diferenças conduzem por vezes a uma dispersão elevada dos valores desta característica, obtidos no âmbito de ações de acompanhamento da produção dos varões de aço para betão armado, dificultando a sua apreciação.

O presente artigo apresenta um estudo comparativo entre os valores de A_{gt} obtidos em 280 ensaios de varões com diferentes origens, diâmetros e classes de resistência. Para cada um dos provetes ensaiados, o valor de A_{gt} foi determinado através dos dois métodos atrás referidos, tendo ainda sido utilizados simultaneamente dois extensómetros colocados em zonas diferentes do provete.

Com base na comparação entre os resultados obtidos num mesmo provete, em cada um dos ensaios, foram elaboradas propostas de alteração do método baseado na utilização de um extensómetro, de modo a reduzir os desvios entre os respetivos resultados e os obtidos por medição manual.

Por fim, procede-se à validação do novo método de medição com base nos resultados de outros 110 ensaios de tração.

Palavras-chave: Betão armado / Varões de aço / Ensaio de tração / Extensão total na força máxima / Método de medição

Introdução

A extensão total na força máxima, A_{gt} , é uma das características do aço dos varões para betão armado que permite avaliar a sua ductilidade, sendo por isso importante para avaliar o desempenho destes varões em regime elastoplástico.

Esta característica é avaliada através de ensaios de tração de provetes retirados de varões, sendo habitualmente utilizados dois tipos de métodos diferentes para a sua determinação, ambos previstos nos documentos normativos existentes (Filipe *et al*, 2014).

Um dos métodos utilizados baseia-se na medição manual da deformação permanente sofrida pelo provete durante o ensaio num determinado comprimento de referência, definido por marcas traçadas na superfície do provete antes de se iniciar o ensaio.

Embora este método seja geralmente considerado, nos documentos normativos aplicáveis, como sendo o método de referência a considerar em caso de litígio, a determinação do valor de A_{gt} no âmbito dos ensaios de rotina para o controlo interno da produção dos varões de aço, pelo respetivo fabricante, baseia-se frequentemente no seu cálculo automático a partir do registo força-deformação, obtido ao longo do ensaio com recurso a um extensómetro colocado sobre o provete.

No entanto, verificam-se frequentemente diferenças muito significativas entre os valores de A_{gt} obtidos através dos dois métodos referidos, por medição manual ou medição através de um extensómetro (Louro *et al*, 2016). Estas diferenças, aliadas à variabilidade desta característica entre diferentes lotes da produção de um determinado tipo de varão, conduzem por vezes a uma dispersão bastante elevada dos valores de A_{gt} obtidos no âmbito de ações de acompanhamento da produção dos varões de aço para betão armado, dificultando a sua apreciação.

O presente artigo apresenta uma proposta de alteração do método de determinação do valor de A_{gt} baseado na utilização de um extensómetro, com o objetivo de reduzir os desvios entre os respetivos resultados e os obtidos por medição manual.

Em seguida é apresentada uma aplicação deste método à determinação dos valores de A_{gt} num conjunto de 110 ensaios de tração de varões de aço das classes A400 NR SD e A500 NR SD. Os valores obtidos por este novo método para cada provete são comparados com os obtidos através do método de medição manual no mesmo provete.

Métodos de determinação da extensão total na força máxima

Determinação de A_{gt} com recurso a um extensómetro colocado no provete

De acordo com a normativa portuguesa aplicável a varões de aço para betão armado (Especificações LNEC), o ensaio de tração deve ser realizado de acordo com a Norma Internacional ISO 15630-1. Por sua vez, esta norma indica que a determinação da extensão total na força máxima deve ser efetuada segundo a Norma Internacional ISO 6892-1, através de um dos seguintes métodos:

- Determinação através do diagrama tensão-extensão;
- Determinação através da medição da deformação do provete após a sua rotura.

De acordo com a Norma ISO 6892-1, a extensão total na força máxima, A_{gt} , é definida através da soma da extensão elástica com a extensão permanente, A_g , correspondentes ao valor máximo da tensão, R_m , no diagrama tensão-extensão obtido através de um ensaio de tração.

No caso de a determinação da extensão total na força máxima ser efetuada a partir do registo força-deformação obtido ao longo de todo o ensaio, com recurso a um extensómetro colocado sobre o provete (Figura 1), existem diferentes modos de obter a extensão total na força máxima; cada um deles pode conduzir a valores bastante diferentes de A_{gt} .

Estas diferenças resultam do facto de o registo força-deformação (e, conseqüentemente, o correspondente diagrama tensão-extensão) diferir frequentemente do diagrama exibido na Figura 2. Em vez de apresentar um único valor máximo para a força de ensaio (que corresponde à tensão de rotura do aço, R_m), o diagrama pode apresentar diversas ocorrências deste valor máximo ou, até, um patamar horizontal na força máxima.



Figura 1: Colocação de um extensómetro no varão para determinação da extensão total na força máxima, através do ensaio de tração.

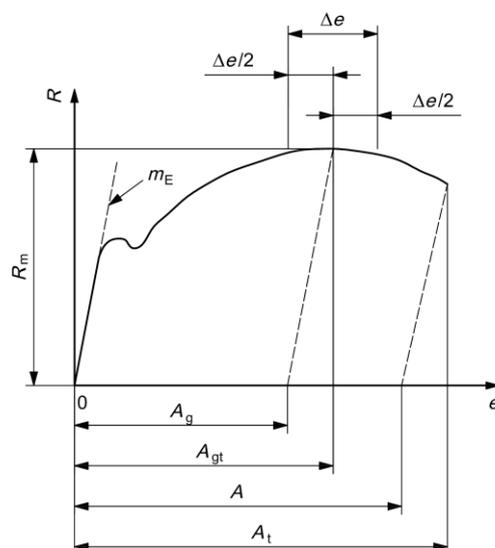


Figura 2: Determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} , através de um diagrama tensão-extensão, obtido num ensaio de tração de um varão de aço (ISO 6892-1:2009).

A ocorrência destes fenómenos depende de diversos fatores, tais como a velocidade de ensaio, as características da máquina de ensaio, ou a ocorrência de fenómenos de estricção em diversas secções transversais, distribuídas de forma aleatória ao longo do comprimento do provete, que poderão estar situadas (ou não) no interior da base de medição do extensómetro.

Uma vez que, por definição, a extensão permanente, A_g , corresponde ao valor máximo da tensão, R_m , e atendendo a que existem vários pontos do diagrama onde o valor de R_m corresponde a diferentes valores de A_g , surge a dúvida sobre o valor a considerar para esta característica. Conforme a opção tomada, poderão ser obtidos valores bastante diferentes de A_g e, consequentemente, da extensão total na força máxima, A_{gt} .

De acordo com a Norma NP EN ISO 6892: “No caso dos materiais que apresentem um patamar na força máxima, a extensão total na força máxima é determinada a partir do ponto médio do patamar” (Figura 2). Na realidade, a adoção do ponto médio do patamar como referência é apenas uma convenção que não corresponde, necessariamente, à solução mais correta ou, noutros termos, à solução obtida através do método de medição manual. Note-se que, existindo um patamar na força máxima, o resultado escolhido para A_{gt} pode variar dentro de uma gama de valores bastante extensa, compreendida entre as extremidades desse patamar.

Por outro lado, a Norma ISO 15630-1, na sua versão de 2002, indica que, no caso de a extensão ser calculada a partir de um diagrama tensão-extensão fornecido por um extensómetro, o valor da extensão total na força máxima, A_{gt} , corresponde ao valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui 0,5 % em relação ao valor da força máxima obtida durante o ensaio. Faz-se notar que esta queda da força poderá ocorrer mais de uma vez ao longo do ensaio; no entanto, poder-se-á considerar que a norma se refere à última queda da força antes da rotura do provete.

Entretanto, a referida Norma ISO 15630-1:2002 foi anulada e substituída por uma nova versão, publicada em 2010, onde foi eliminado o parágrafo que prescrevia o método atrás descrito.

Determinação de A_{gt} através da medição manual da deformação permanente

A Norma Europeia EN ISO 6892 inclui um anexo informativo (Anexo I) com a descrição de um método de “Determinação da extensão permanente sem estrição, A_{wn} , para produtos longos tais como varões, arames e fio máquina”. De acordo com uma Nota deste Anexo I, este método permite obter aproximadamente o valor da extensão permanente na força máxima, A_g , quando a força máxima ocorre no mesmo instante em que se inicia a estrição do material.

O método de medição manual da deformação permanente descrito nesta norma consiste em medir, no fragmento mais longo do provete após a sua rotura (Figura 3), o comprimento final entre referências, L'_u , com base no qual é calculada a extensão total na força máxima:

$$A_{gt} = \left(\frac{R_m}{E} + \frac{L'_u - L'_o}{L'_o} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que L'_o representa o comprimento inicial entre referências, R_m representa a tensão máxima registada no decorrer do ensaio e E representa o módulo de elasticidade do material.



Figura 3: Medição do comprimento final entre referências, L'_u , após a rotura do provete.

Na prática constata-se que durante o ensaio de tração poderão ocorrer fenómenos de estricção em diversas secções transversais, distribuídas de forma aleatória ao longo do comprimento do provete. Este facto pode dar origem a um aumento imprevisto do valor de A_{gt} , no caso de, antes da rotura, se terem já iniciado outros fenómenos de estricção no interior do segmento do provete onde se procedeu à medição do comprimento final entre referências.

Este mesmo fenómeno pode conduzir a diferenças apreciáveis entre o valor de A_{gt} obtido através do método de medição manual da deformação permanente e o valor desta característica obtido com recurso a um extensómetro colocado no provete, sobretudo se os valores da deformação permanente forem medidos em diferentes segmentos do provete, em cada um dos casos.

Fontes de incerteza na determinação do valor de A_{gt}

As diferenças importantes observadas entre os coeficientes de variação dos valores de A_{gt} referentes a amostras fornecidas por diferentes produtores indicam que existem outras fontes de incerteza na determinação dos valores da extensão total na força máxima, alheias ao método de ensaio utilizado.

A dispersão dos valores de A_{gt} pode resultar de vários fatores, tais como: i) o tipo de produto, ii) o diâmetro do varão, iii) a variabilidade de A_{gt} entre diferentes lotes da produção de um determinado tipo de varão, dentro de um mesmo lote, no seio de uma amostra de um lote colhida para ensaio ou, até, ao longo do comprimento do provete ensaiado.

No que se refere ao ensaio, os valores de A_{gt} podem ainda depender, para além do método de ensaio utilizado, das incertezas associadas aos equipamentos de ensaio, utilizados nas medições efetuadas para a avaliação desta característica, e à atuação do operador que realizou o ensaio.

De âmbito de um estudo realizado no LNEC (André; Baptista; 2009), relativo à avaliação das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tração, foram identificadas várias fontes de incerteza que afetam os valores da extensão total na força máxima, tais como:

- Desvios da geometria do provete em relação à sua configuração nominal;
- Instrumento utilizado na aposição de marcas de referência na superfície dos provetes;
- Incerteza(s) do(s) instrumento(s) utilizado(s) na medição de comprimentos;
- Tipo de máquina de ensaio de tração;
- Posição (das nervuras) do provete nas garras da máquina;
- Verticalidade do provete;
- Posicionamento do extensómetro sobre o provete;
- Operador do ensaio;
- Velocidade de ensaio;
- Determinação da tensão de rotura, R_m ;
- Procedimento de medição manual dos alongamentos;
- Zona de medição dos alongamentos.

Estudo da influência do método de ensaio

Em geral, verifica-se que os valores da extensão total na força máxima, A_{gt} , apresentam uma dispersão bastante mais elevada que as outras características avaliadas através do ensaio de tração, tais como a tensão de cedência ou a tensão de rotura, por exemplo.

Uma vez que as fontes de incerteza inerentes ao tipo de produto em questão e ao seu processo produtivo, alheias à avaliação experimental de A_{gt} , são mais difíceis de controlar, é aconselhável investir na redução das incertezas associadas ao ensaio de tração e, em particular, ao método de medição das deformações do provete.

A fim de se avaliar a influência do método de medição das deformações do provete levou-se a cabo um estudo experimental no LNEC que envolveu a realização de um total de 280 ensaios de tração, em varões de aço de cinco classes de resistência diferentes e com 9 diâmetros distintos (Mendes; 2016).

Em cada um destes 280 ensaios procedeu-se à medição da extensão permanente através dos dois métodos de determinação previstos nas normas de referência: medição manual e medição com recurso a um extensómetro colocado no provete. No segundo caso foram utilizados dois extensómetros distintos (Ext1 e Ext2) que registaram em simultâneo as deformações do provete.

A fim de analisar a influência da localização do extensómetro foram testados diferentes posicionamentos relativos dos dois extensómetros sobre o provete, através: (i) da instalação dos dois extensómetros no centro do provete e (ii) da instalação de um dos extensómetros na zona superior do provete e do outro na zona inferior do provete.

A distribuição dos referidos 280 ensaios pelos diferentes diâmetros e classes de resistência é apresentada no Quadro 1. Neste quadro é também indicado o posicionamento dos extensómetros sobre o provete.

Quadro 1: Ensaios de tração realizados, por diâmetro e por tipo de aço, adaptado de (Mendes; 2016)

Condições do ensaio	Tipos de aço	Número de ensaios	Diâmetros (mm)									Total de ensaios	
			6	8	10	12	14	16	20	25	32		
Instalação dos extensómetros no centro do provete	A500 ER	20	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240
	A400 NR	30	-	-	-	10	-	20	-	-	-	-	
	A500 NR	30	-	20	-	-	-	-	-	-	10	-	
	A400 NR SD	70	-	-	20	10	-	10	20	10	-	-	
	A500 NR SD	90	-	20	30	10	10	-	-	20	-	-	
Instalação dos extensómetros nas zonas superior e inferior do provete	A400 NR	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	40
	A500 NR	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	
	A400 NR SD	10	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-	
	A500 NR SD	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	

No Quadro 2 é apresentada uma comparação entre valores de A_{gt} obtidos pelos dois métodos de determinação anteriormente mencionados. Para cada tipo de aço indicam-se vários parâmetros estatísticos referentes aos resultados obtidos através de cada um dos três processos de medição referidos, e à relação entre valores de A_{gt} adquiridos com recurso a um dos dois extensómetros (Ext1 e Ext2) e os correspondentes valores de referência de A_{gt} obtidos por medição manual.

Os parâmetros estatísticos referentes a cada um dos conjuntos de resultados analisados no Quadro 2 incluem, para cada classe de resistência do aço, a média, o desvio-padrão, os valores extremos (mínimo e máximo) e os valores característicos mínimo e máximo (correspondentes aos quantilhos de 5% e de 95%), avaliados com um nível de confiança de 95% e tendo em conta o número de resultados disponíveis para cada tipo de aço.

Os valores apresentados no Quadro 2 permitem constatar que, no conjunto dos resultados analisados, os valores de A_{gt} obtidos por medição manual são, em média, superiores aos obtidos com recurso a qualquer um dos extensómetros utilizados.

O valor médio da relação entre os valores de A_{gt} obtidos em cada um dos provetes pelos dois métodos referidos varia entre 0,856 e 0,989, no caso do extensómetro Ext1, e entre 0,854 e 0,972 no caso do extensómetro Ext2.

Quadro 2: Comparação entre valores de A_{gt} obtidos com recurso a um dos dois extensómetros (Ext1 e Ext2) colocados no provete, e por medição manual, A_{gt} (manual)

		A_{gt} (%) (manual)	A_{gt} (%) (Ext1)	$\frac{A_{gt}(Ext1)}{A_{gt}(manual)}$	A_{gt} (%) (Ext2)	$\frac{A_{gt}(Ext2)}{A_{gt}(manual)}$
A500 ER	Média	4,5	4,1	0,921	4,0	0,894
	Desv. Padrão	0,8	0,7	0,122	0,7	0,100
	Mínimo	3,3	2,7	0,698	2,9	0,755
	Máximo	6,2	5,4	1,118	5,4	1,172
	Valor caract. Min	2,5	2,3	0,629	2,3	0,654
	Valor caract. Max	6,4	5,9	1,213	5,6	1,133
A400 NR	Média	16,7	14,1	0,856	14,1	0,854
	Desv. Padrão	1,9	1,5	0,091	1,5	0,090
	Mínimo	13,3	11,7	0,677	11,7	0,677
	Máximo	20,5	16,9	1,098	16,8	1,072
	Valor caract. Min	12,6	10,8	0,653	10,7	0,655
	Valor caract. Max	20,8	17,4	1,059	17,5	1,053
A500 NR	Média	9,4	9,2	0,989	9,1	0,972
	Desv. Padrão	1,3	1,1	0,136	1,1	0,117
	Mínimo	6,1	7,0	0,707	6,5	0,796
	Máximo	11,5	11,7	1,363	12,5	1,336
	Valor caract. Min	6,6	6,8	0,700	6,7	0,722
	Valor caract. Max	12,3	11,6	1,277	11,5	1,223
A400 NR SD	Média	15,7	14,0	0,901	14,5	0,933
	Desv. Padrão	2,1	1,2	0,092	1,5	0,111
	Mínimo	12,1	11,3	0,707	11,3	0,712
	Máximo	21,3	17,9	1,224	18,0	1,241
	Valor caract. Min	11,7	11,7	0,724	11,6	0,719
	Valor caract. Max	19,6	16,2	1,077	17,3	1,146
A500 NR SD	Média	11,0	9,9	0,908	10,0	0,915
	Desv. Padrão	1,8	1,5	0,096	1,6	0,104
	Mínimo	7,8	7,1	0,692	7,1	0,668
	Máximo	16,0	13,7	1,276	13,9	1,198
	Valor caract. Min	7,5	7,0	0,725	7,0	0,715
	Valor caract. Max	14,6	12,8	1,090	13,0	1,114

As maiores diferenças foram obtidas no caso do aço A400 NR. Em média, o valor de A_{gt} obtido com recurso a um extensómetro, A_{gt} (Ext), é 15% inferior ao valor determinado por medição manual, A_{gt} (manual). Além disso, em 5% dos casos o valor de A_{gt} (Ext) poderá ser inferior a 65% do valor de A_{gt} (manual); por outro lado, em cerca de 5% dos casos o valor de A_{gt} (Ext) poderá exceder em mais de 6% o valor de A_{gt} (manual). Estes resultados evidenciam a grande dispersão da relação entre os resultados obtidos por cada um dos dois métodos, em consequência das fontes de incerteza anteriormente referidas.

No caso do aço A500 NR foi observada uma melhor concordância entre os resultados dos dois métodos. Em média, o valor de A_{gt} (Ext) é 2% inferior ao valor de A_{gt} (manual). Porém, é no caso deste tipo de aço que se observam as maiores dispersões de resultados. Em 5% dos casos o valor

de A_{gt} (Ext) poderá ser inferior a 70% do valor de A_{gt} (manual), enquanto que em cerca de 5% dos casos o valor de A_{gt} (Ext) poderá exceder em mais de 27% o valor de A_{gt} (manual).

No caso dos restantes tipos de aço os valores de A_{gt} (Ext) são, em média, 9% inferiores aos valores de A_{gt} (manual). Cerca de 5% dos valores de A_{gt} (Ext) poderão ser inferiores a 72% do valor de A_{gt} (manual), enquanto que em cerca de 5% dos casos o valor de A_{gt} (Ext) poderá exceder em mais de 11% o valor de A_{gt} (manual).

Alteração do método de determinação através de um extensómetro

A fim de se tentar reduzir as diferenças entre os valores de A_{gt} obtidos através de cada um dos dois métodos de determinação previstos na norma portuguesa NP EN ISO 6892-1, foi realizado um novo estudo com base nos resultados dos ensaios referidos no Quadro 1, com o objetivo de introduzir alterações no método de determinação através de um extensómetro que possibilitem obter valores de A_{gt} mais próximos dos valores de referência, obtidos por medição manual.

Para tal procedeu-se à busca, em cada um dos registos força-deformação dos extensómetros Ext1 e Ext2, obtidos em cada um dos 280 ensaios de tração indicados no Quadro 1, do valor da força F_{Agt} que corresponde ao valor de A_{gt} obtido no mesmo ensaio através do método de referência (método de medição manual). Em seguida, determinou-se a relação entre os valores de F_{Agt} e da força máxima F_m registada no mesmo ensaio de tração. Finalmente, avaliou-se o valor médio desta relação, $k = F_{Agt}/F_m$.

Quadro 3: Valores médios do coeficiente $k = F_{Agt}/F_m$, obtidos a partir das medições efetuadas com cada um dos dois extensómetros (Ext1 e Ext2) colocados no provete

		k (Ext1)	k (Ext2)
A500 ER	Média	0,9986	0,9994
	Desv, Padrão	0,0024	0,0007
	Mínimo	0,9915	0,9978
	Máximo	1,0000	1,0000
A400 NR	Média	0,9975	0,9977
	Desv, Padrão	0,0024	0,0025
	Mínimo	0,9916	0,9895
	Máximo	0,9998	0,9998
A500 NR	Média	0,9977	0,9981
	Desv, Padrão	0,0031	0,0026
	Mínimo	0,9897	0,9899
	Máximo	1,0000	1,0000
A400 NR SD	Média	0,9976	0,9977
	Desv, Padrão	0,0027	0,0030
	Mínimo	0,9884	0,9828
	Máximo	1,0000	1,0000
A500 NR SD	Média	0,9973	0,9975
	Desv, Padrão	0,0032	0,0032
	Mínimo	0,9848	0,9858
	Máximo	1,0000	1,0002

A proposta de alteração ao método de determinação de A_{gt} através de um extensómetro consiste em utilizar o referido valor médio para calcular, em cada novo ensaio de tração, o valor da força $F_{Agt} = k F_m$; o valor de A_{gt} será o maior dos valores da extensão total que no registo força-deformação do mesmo ensaio corresponde ao valor desta força F_{Agt} .

Este novo método é semelhante ao indicado na Norma ISO 15630-1:2002, atrás referido, que consiste em adotar o maior valor da extensão total que corresponde a uma força de ensaio igual a $0,995 F_m$. A principal diferença reside no valor da força de referência para se efetuar a medição de A_{gt} .

No Quadro 3 são apresentados os valores médios do coeficiente $k = F_{A_{gt}}/F_m$, obtidos a partir das medições efetuadas com cada um dos dois extensómetros (Ext1 e Ext2) colocados no provete.

É possível constatar que, com exceção do caso dos varões de aço da classe A500 ER, os valores de k obtidos com qualquer um dos dois extensómetros são idênticos para as outras quatro classes de resistência do aço. Faz-se notar, no entanto, que uma pequena variação no valor de k pode conduzir a variações significativas no valor de A_{gt} , devido ao declive muito reduzido da curva força-deformação na zona de medição de A_{gt} .

Validação do novo método de determinação do valor de A_{gt}

A fim de validar o novo método de determinação do valor de A_{gt} obtido com recurso a um extensómetro, A_{gt} (Ext), foi realizado um novo estudo com base nos resultados de 110 ensaios de tração de varões de aço das classes A400 NR SD (40 ensaios) e A500 NR SD (70 ensaios), diferentes dos indicados no Quadro 1.

No âmbito deste estudo procedeu-se à busca, no registo força-deformação obtido em cada um destes 110 ensaios com recurso a um extensómetro, dos seguintes valores:

- extensão total na força máxima, A_{gt} (Ext); no caso de um registo apresentar um patamar na força máxima, F_m , foram anotados os valores de A_{gt} (Ext.min) e de A_{gt} (Ext.max), que correspondem aos limites extremos desse patamar de força;
- extensão total, A_{gt} ($0,995 F_m$), que corresponde ao maior valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui 0,5 %, conforme previsto no método alternativo indicado na Norma ISO 15630-1:2002;
- extensão total, A_{gt} ($0,998 F_m$), que corresponde ao maior valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui para $F_{A_{gt}} = k F_m$, em que o valor de $k = 0,998$ corresponde a um valor médio deste coeficiente obtido para o conjunto dos 280 ensaios a que se refere o Quadro 3;
- extensão total, A_{gt} ($k_A F_m$), que corresponde ao maior valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui para $F_{A_{gt}} = k_A F_m$. No caso dos varões de aço da classe A400 NR SD, o valor de k_A foi tomado igual a 0,99765, com base no valor médio dos coeficientes k indicados no Quadro 3 para este aço; pelas mesmas razões foi adotado o coeficiente $k_A = 0,9974$ para os varões de aço da classe A500 NR SD.

No Quadro 4 são apresentados vários parâmetros estatísticos referentes aos valores extremos de A_{gt} (Ext), bem como aos valores de A_{gt} ($0,998 F_m$), A_{gt} ($k_A F_m$) e A_{gt} ($0,995 F_m$) anteriormente referidos, obtidos através do novo método, em cada um dos 110 ensaios.

Os parâmetros estatísticos apresentados são os mesmos que os utilizados no Quadro 2. Os seus valores são apresentados para o conjunto dos 40 ensaios de varões de aço da classe A400 NR SD, para o conjunto dos 70 ensaios de varões de aço da classe A500 NR SD, e para a totalidade dos 110 ensaios de varões de aço de ambas as classes de resistência.

É possível constatar que os valores de A_{gt} obtidos com recurso a um extensómetro, variam, em média, entre 95,6% e 98,7% dos valores de A_{gt} determinados por medição manual, no caso dos varões de aço da classe A400 NR SD. No caso dos varões de aço da classe A500 NR SD, esta variação tem lugar entre 90,9% e 92,9% dos valores de A_{gt} (manual). No conjunto dos dois tipos de aço, a mesma variação ocorre entre 92,7% e 95,2% dos correspondentes valores de A_{gt} (manual).

No entanto, os valores extremos de A_{gt} (Ext) medidos no âmbito deste estudo variaram entre 78% e 134% dos valores de A_{gt} (manual), no caso do aço A400 NR SD, e entre 69% e 124% dos valores de A_{gt} (manual), no caso do aço A500 NR SD. Este facto evidencia, uma vez mais, a grande dispersão dos valores da relação entre os resultados de A_{gt} obtidos com recurso a um extensómetro ou por medição manual.

No que se refere à verificação dos valores obtidos através do novo método de determinação de A_{gt} para os varões de aço da classe A400 NR SD é possível constatar que, em média, os valores de A_{gt} (0,998 F_m) são 5,5% superiores aos valores de A_{gt} (manual), enquanto que os valores de A_{gt} ($k_A F_m$) e de A_{gt} (0,995 F_m) são, em média, 6,1% e 8,7% superiores aos valores de A_{gt} (manual), respetivamente.

Quadro 4: Comparação entre valores obtidos através do novo método de determinação do valor de A_{gt} com recurso a um extensómetro e por medição manual

		$\frac{A_{gt} \text{ (Ext.min)}}{A_{gt} \text{ (manual)}}$	$\frac{A_{gt} \text{ (Ext.max)}}{A_{gt} \text{ (manual)}}$	$\frac{A_{gt} \text{ (0,998 } F_m)}{A_{gt} \text{ (manual)}}$	$\frac{A_{gt} \text{ (} k_A F_m)}{A_{gt} \text{ (manual)}}$	$\frac{A_{gt} \text{ (0,995 } F_m)}{A_{gt} \text{ (manual)}}$
A400 NR SD	Média	0,9557	0,9869	1,0548	1,0611	1,0866
	Desv, Padrão	0,1466	0,1532	0,1581	0,1595	0,1673
	Mínimo	0,7785	0,7935	0,8434	0,8444	0,8473
	Máximo	1,2947	1,3371	1,4329	1,4433	1,4802
	Valor caract, Min	0,6434	0,6606	0,7180	0,7213	0,7302
	Valor caract, Max	1,2680	1,3132	1,3916	1,4009	1,4430
A500 NR SD	Média	0,9086	0,9293	1,0067	1,0157	1,0374
	Desv, Padrão	0,1083	0,1116	0,1312	0,1356	0,1489
	Mínimo	0,7464	0,7751	0,8082	0,8082	0,8082
	Máximo	1,1878	1,2404	1,3731	1,3908	1,4434
	Valor caract, Min	0,6931	0,7073	0,7455	0,7459	0,7411
	Valor caract, Max	1,1241	1,1513	1,2678	1,2855	1,3336
A400 NR SD	Média	0,9269	0,9517	1,0254	1,0334	1,0565
+	Desv, Padrão	0,1259	0,1316	0,1434	0,1462	0,1573
A500 NR SD	Mínimo	0,7464	0,7751	0,8082	0,8082	0,8082
	Máximo	1,2947	1,3371	1,4329	1,4433	1,4802
	Valor caract, Min	0,6864	0,7003	0,7515	0,7541	0,7562
	Valor caract, Max	1,1675	1,2030	1,2993	1,3126	1,3569

No caso dos varões de aço da classe A500 NR SD os valores de A_{gt} (0,998 F_m) são, em média, apenas 0,7% superiores aos valores de A_{gt} (manual), enquanto que os valores de A_{gt} ($k_A F_m$) e de A_{gt} (0,995 F_m) são, em média, 1,6% e 3,7% superiores aos valores de A_{gt} (manual), respetivamente.

Neste último caso foi possível obter um melhor ajustamento dos valores de A_{gt} obtidos através do novo método aos valores de A_{gt} determinados por medição manual, por comparação com os valores de A_{gt} correspondentes à força máxima de ensaio no registo força-deformação do ensaio, em que estes valores eram 9,1% a 7,0% inferiores aos valores de A_{gt} (manual). No entanto, importa salientar mais uma vez a dispersão dos resultados obtidos; os valores de A_{gt} (0,998 F_m) variaram entre 81% e 137% de A_{gt} (manual), enquanto que os de A_{gt} (0,995 F_m) variaram entre 81% e 144% de A_{gt} (manual).

Os valores apresentados para o conjunto dos aços das classes A400 NR SD e A500 NR SD refletem o efeito global da utilização do novo método de determinação do valor de A_{gt} .

De acordo com os valores apresentados, conclui-se que a melhor opção consistirá em adotar os valores de A_{gt} (0,998 F_m) para todos os tipos de aço, uma vez que são estes que, em média, se encontram mais próximos dos de A_{gt} (manual). Em princípio, obter-se-á desta forma uma melhor concordância entre os resultados fornecidos pelo extensómetro e os obtidos através de uma medição manual que no caso da leitura de A_{gt} correspondente à força máxima F_m , A_{gt} (Ext), ou a uma queda de 0,5 % desta força, A_{gt} (0,995 F_m).

Assinala-se, ainda assim, a elevada dispersão sempre presente em todos os resultados, a qual será uma consequência não só do método de medição adotado e das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tração, mas também da variação aleatória das características do material ao longo do comprimento de um determinado varão de aço.

Com efeito, supõe-se que grande parte das diferenças observadas entre os resultados de A_{gt} (Ext) e de A_{gt} (manual) resulta do facto de se estarem a comparar valores que não são diretamente comparáveis, pois as zonas do varão onde são realizadas as medições com o extensómetro ou pelo método manual são frequentemente diferentes; no primeiro caso essa zona é definida antes do ensaio e no segundo caso ela depende da localização da secção de rotura do varão.

Uma vez que esta última é aleatória, a localização do comprimento final entre referências onde se procede à leitura das deformações é também aleatória.

Sabe-se que, frequentemente, a deformação de um provete de varão de aço durante um ensaio de tração não é uniforme ao longo da sua zona útil, devido a possíveis heterogeneidades do material e da geometria do varão ao longo do seu comprimento. Este facto implica que, durante o ensaio de tração, o processo de estrição possa ter sido iniciado em diferentes secções transversais do varão, para além daquela onde ocorre a sua rotura; se uma destas secções se localizar no interior do comprimento final entre referências utilizado, L'_u , o valor de A_{gt} pode ser afetado pelas deformações ocorridas ao nível dessa secção, durante o seu processo de estrição.

Além disso, a proximidade do comprimento final L'_u de uma zona perturbada pela influência de uma das amarrações do provete, ou pela estrição na vizinhança da secção de rotura do provete, pode também afetar a determinação do valor da extensão total na força máxima.

Estes fatores poderão também afetar a determinação do valor de A_{gt} obtido através da medição por um extensómetro. Neste caso, as medições encontram-se condicionadas pelo posicionamento do extensómetro no provete, relativamente à secção onde ocorre a rotura. Dependendo do comprimento de base do extensómetro, é provável que possam ocorrer outros fenómenos de estrição simultâneos no interior deste comprimento, mas fora do comprimento final entre referências utilizado na medição manual. Sendo assim, o valor de A_{gt} (Ext) poderá ser superior ao de A_{gt} (manual), justificando-se, deste modo, os valores da relação A_{gt} (Ext)/ A_{gt} (manual) superiores a 1.

Conclusões

O presente artigo apresenta uma proposta de alteração do método de determinação da extensão total na força máxima, A_{gt} , baseado na utilização de um extensómetro, com o objetivo de reduzir os desvios entre os respetivos resultados e os obtidos por medição manual.

Após a definição de cada um destes métodos de determinação do valor de A_{gt} e das várias fontes de incerteza que afetam os valores fornecidos por cada um deles, descreve-se um estudo experimental realizado no LNEC, que envolveu a realização de um total de 280 ensaios de tração em varões de aço de cinco classes de resistência diferentes e com 9 diâmetros distintos. Com base nos resultados destes ensaios foi elaborado um novo método de medição com recurso a um extensómetro, que constitui um aperfeiçoamento de um método alternativo previsto na Norma ISO 15630-1:2002.

Por fim, procedeu-se à validação deste novo método de medição, com base nos resultados de outros 110 ensaios de tração, referentes a varões de aço das classes A400 NR SD e A500 NR SD.

De entre cinco métodos diferentes de medição com um extensómetro analisados concluiu-se que aquele que, em média, fornece resultados mais próximos dos obtidos por medição manual consiste na determinação do valor da extensão total na força máxima, A_{gt} , que, no diagrama tensão-extensão fornecido pelo extensómetro, corresponde ao maior valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui 0,2 % em relação ao valor da força máxima obtida durante o ensaio.

A utilização deste novo método poderá melhorar um pouco a concordância entre os valores de A_{gt} , obtidos através dos dois métodos de medição previstos na normalização aplicável. As diferenças habitualmente observadas entre esses valores podem por vezes dificultar a sua apreciação, nomeadamente quando conduzem a conclusões diferentes no âmbito de um processo de avaliação da qualidade dos varões de aço a que dizem respeito.

Assinala-se, no entanto, a elevada dispersão habitualmente associada aos valores de A_{gt} obtidos por qualquer um dos métodos, devido à influência de fatores aleatórios associados à produção dos varões e, como tal, alheios ao procedimento de ensaio seguido e ao método de medição utilizado na determinação do valor de A_{gt} .

Com efeito, constata-se que, em geral, os valores da extensão total na força máxima, A_{gt} , apresentam uma variação bastante mais elevada que os das outras características avaliadas através do ensaio de tração, tais como a tensão de cedência ou a tensão de rotura, por exemplo. A grande dispersão dos valores de A_{gt} pode conduzir a uma estimativa demasiado conservativa do seu valor característico e, no limite, à violação dos critérios de classificação do aço do varão numa dada classe de resistência.

Em face desta dispersão afigura-se ser de bastante utilidade a realização de estudos adicionais sobre a influência dessa dispersão nos critérios de avaliação de conformidade da qualidade dos varões de aço para betão armado com as exigências prescritas nas respetivas normas de produto ou noutros documentos normativos aplicáveis. Os resultados apresentados no presente artigo, referentes à análise dos dois conjuntos de 280 e de 110 ensaios de tração, poderão fornecer uma contribuição para esses estudos.

Referências bibliográficas

- E 456:2011 – **Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado, Campo de aplicação, características, ensaios e marcação**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 450:2010 – **Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado, Características, ensaios e marcação**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 460:2010 – **Varões de aço A500 NR SD de ductilidade especial para armaduras de betão armado, Características, ensaios e marcação**, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- ISO 15630-1:2002 – **Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire**, International Organization for Standardization (ISO).
- NP EN ISO 15630-1:2012 – **Aços para armaduras de betão armado e pré-esforçado; Métodos de ensaio; Parte 1: Varões, fio máquina e fio para betão armado**, Instituto Português da Qualidade (IPQ).
- ISO 6892-1:2009 – **Matériaux métalliques, Essai de traction, Partie 1: Méthode d'essai à température ambiante**, International Organization for Standardization (ISO), 67 p.
- EN ISO 6892-1:2009 – **Metallic materials, Tensile testing, Part 1: Method of test at room temperature**, Comité Européen de Normalisation (CEN), 70 p.
- NP EN ISO 6892-1:2009 – **Materiais metálicos, Ensaio de tracção, Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 75 p.
- ANDRÉ, J.; BAPTISTA, A.M., 2009 - **Avaliação das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tracção realizados no laboratório de ensaios de produtos metálicos**, Relatório nº 331/2009, LNEC, 173 p.
- FILIFE, J., *et al*, 2014 – **Influência do método de ensaio nos valores da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado** JPEE 2014 – 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, LNEC, 15 p.
- LOURO, A., *et al*, 2016 – **Extensão total na força máxima de varões de aço, Comparação dos resultados obtidos através de diferentes métodos de ensaio**, QIC2016 – 2º Encontro Nacional sobre Qualidade e Inovação na Construção, Lisboa, LNEC.
- MENDES, R. – **DUCTILIDADE DAS ARMADURAS DE AÇO PARA BETÃO ARMADO - Influência do Método de Ensaio na Determinação da Extensão Total na Força Máxima**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialidade de Estruturas, submetida no Instituto Politécnico de Setúbal, Março de 2016.