

## INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE ENSAIO NOS VALORES DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA EM VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO



João Filipe

Bolseiro  
LNEC  
Lisboa  
jfilipe@lnec.pt



Ricardo Mendes

Bolseiro  
LNEC  
Lisboa  
rmendes@lnec.pt



Ana Louro

Bolseira  
LNEC  
Lisboa  
analouro@lnec.pt



António M. Baptista

Investigador Principal  
LNEC  
Lisboa  
ambaptista@lnec.pt

### SUMÁRIO

No presente trabalho discute-se a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado.

Apresenta-se uma análise comparativa entre os valores da extensão total na força máxima obtidos em varões de diferentes tipos, com vários diâmetros e produzidos por diversos fabricantes. São também analisadas as diferenças entre os valores desta característica mecânica, obtidos por diversas entidades e através de diferentes métodos de ensaio para varões do mesmo lote.

Com base nestas análises comparativas discute-se o impacto das incertezas associadas ao método de ensaio na dispersão dos valores desta característica, bem como a influência de outros parâmetros alheios ao ensaio.

**Palavras-chave:** Betão armado; Varões de aço; Ensaio de tracção; Extensão total na força máxima; Método de medição.

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das características mecânicas do aço dos varões para betão armado determinadas através do ensaio de tracção é a extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ . Esta característica permite avaliar a ductilidade do aço do varão, sendo por isso importante na apreciação do seu desempenho em regime elastoplástico.

De acordo com a Norma Europeia EN ISO 6892 [1], [2] e [3], a extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ , é obtida 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 tracção (Figura 1 [1]).

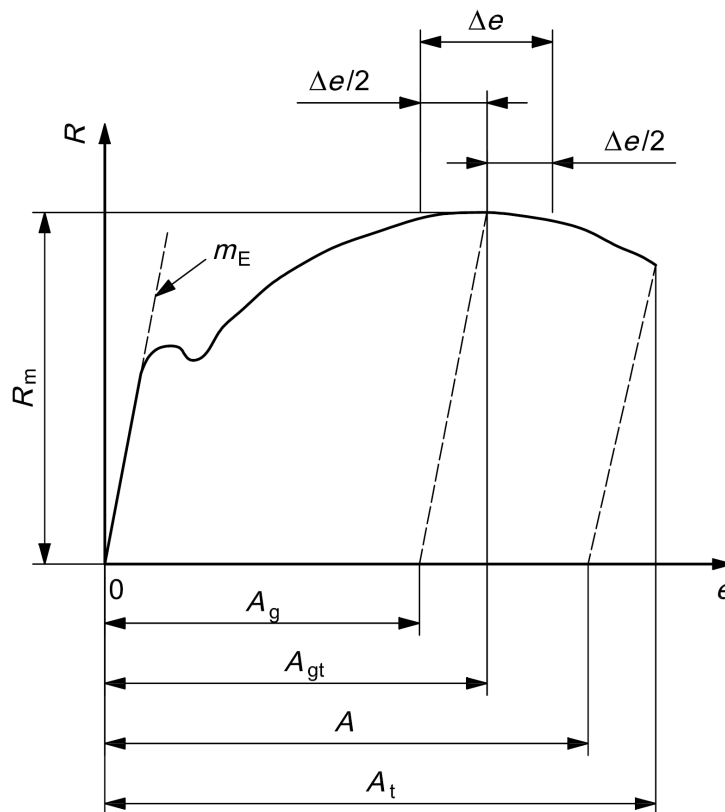


Figura 1. Determinação da extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ , através de um diagrama tensão-extensão, obtido num ensaio de tracção de um varão de aço [1].

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

Esta dispersão pode resultar de vários factores, relacionados: i) com a variabilidade desta característica entre diferentes lotes da produção de um determinado tipo de varão, dentro de um mesmo lote ou, até, no seio de uma amostra de um lote colhida para ensaio, ii) com a utilização de diferentes métodos de ensaio, ou iii) com as incertezas associadas ao método de ensaio usado, aos equipamentos utilizados nas medições efectuadas para a avaliação desta característica, e à actuação do operador que realiza o ensaio.

Nos últimos anos têm vindo a ser realizados estudos que fundamentaram a revisão das técnicas utilizadas no ensaio de tracção dos varões de aço para betão armado, preconizadas nas Normas Internacionais ISO 6892 [1] e ISO 15630-1 [7]; estas normas foram adoptadas como Normas Europeias pelo CEN e, como tal, encontram-se em vigor em Portugal, [3] e [8].

A presente comunicação apresenta um estudo comparativo entre os valores da extensão total na força máxima obtidos em ensaios de varões com diferentes origens, diâmetros e classes de resistência. São também comparados os valores desta característica, referentes a um mesmo produto, do mesmo lote, obtidos por diversas entidades e por diferentes métodos. Esta última comparação revela algumas diferenças importantes e sistemáticas, que indiciam a utilização de diferentes métodos de ensaio na obtenção desses resultados.

Com base nestas observações, foi feita uma análise comparativa da importância das incertezas associadas ao método de ensaio na dispersão dos valores da extensão total na força máxima, e discute-se o interesse da uniformização das técnicas de ensaio para a redução dessa dispersão e, conseqüentemente, para evitar uma desnecessária violação dos critérios de classificação do aço em questão.

## **2. DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO TOTAL NA FORÇA MÁXIMA**

### **2.1 Métodos de determinação**

O princípio de medição da extensão total na força máxima num provete metálico submetido a um ensaio de tracção consiste na determinação do acréscimo do comprimento entre marcas de referência colocadas no provete, no instante em que o provete atinge a força máxima que pode suportar quando submetido a tracção.

De acordo com a normativa portuguesa aplicável a varões de aço para betão armado (Especificações LNEC), o ensaio de tracção deve ser realizado de acordo com a Norma Internacional ISO 15630-1, [7] e [8]. Por sua vez, esta norma [7] indica que a determinação da extensão total na força máxima deve ser efectuada segundo a norma 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.

Apresentam-se seguidamente, de forma resumida, os dois métodos referidos para a determinação da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado.

## 2.2 Determinação através do diagrama tensão-extensão

Este método de determinação da extensão total na força máxima consiste no registo do diagrama tensão-extensão ao longo de todo o ensaio, e na posterior leitura, neste diagrama, da deformação correspondente à força máxima (Figura 1).

O registo do diagrama tensão-extensão pode ser efectuado analogicamente ou através de um sistema de aquisição de dados, com posterior tratamento, através de um *software* de cálculo, da informação recolhida.

No caso de se recorrer a um extensómetro (manual ou automático) para a avaliação da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado (Figura 2), este deve possuir um comprimento de base de pelo menos 100 mm.



Figura 2. Colocação de um extensómetro no varão para determinação da extensão total na força máxima, através do ensaio de tracção.

De acordo com a Norma NP EN ISO 6892 [3], “*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 1).

Por outro lado, é de referir o facto de a Norma ISO 15630-1, na sua versão de 2002 [6], salientar que, no caso de a extensão ser determinada através 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.

Este método de medição, estipulado na Norma ISO 15630-1:2002 [6], pode fornecer valores muito diferentes dos obtidos através do método estabelecido na ISO 6892 [1], atrás referido. Em particular, é provável que os valores determinados de acordo com a Norma ISO 15630-1:2002 [6] sobrestimem os valores de  $A_{gt}$ , pelo facto de, dependendo do posicionamento do extensómetro, os valores medidos poderem incluir deformações plásticas em secções onde o processo de estrição se encontra já em curso.

Entretanto, a referida Norma ISO 15630-1:2002 [6] foi anulada e substituída por uma nova versão, publicada em 2010 [7], onde foi eliminado o parágrafo da versão de 2002 [6] que prescrevia o método atrás descrito, de determinação do valor de  $A_{gt}$  através do valor da extensão registada quando a força de ensaio diminui 0,5 % em relação ao valor da força máxima obtida durante o ensaio de tracção.

### 2.3 Determinação através da medição da deformação do provete após rotura

A Norma Europeia EN 10002-1, [1] e [5], que precedeu a EN ISO 6892 [2], prescrevia no seu Anexo H (informativo) um “*Método manual de determinação da extensão total na força máxima para produtos longos, tais como varões, arames e fio máquina*”.

Embora este Anexo não exista na EN ISO 6892 [2], esta norma inclui, por sua vez, no seu Anexo I (informativo), a descrição de um método de “*Determinação da extensão permanente sem estrição,  $A_{wn}$ , para produtos longos tais como varões, arames e fio máquina*”. Este método é semelhante ao prescrito na norma EN 10002-1 [1] e, conforme referido numa Nota do referido Anexo I, 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 descrito nestas normas consiste em medir, no fragmento mais longo do provete ensaiado à tracção (Figura 3), o comprimento final entre referências,  $L'_u$ , com base no qual é calculada a extensão total na força máxima.



Figura 3. Exemplo da medição do comprimento final entre referências ( $L'_u$ ) após a rotura do provete.

De acordo com estas normas, EN 10002-1 [4] e EN ISO 6892 [2], antes de se iniciar o ensaio de tracção efectua-se marcas de referência equidistantes ao longo da zona útil do provete, com um espaçamento entre marcas consecutivas igual a um submúltiplo do comprimento inicial entre referências,  $L'_o$  (devendo o valor de  $L'_o$  ser superior ou igual ao valor especificado na norma do produto). A marcação dos comprimentos entre referências deverá ser efectuada com uma tolerância de  $\pm 0,5$  mm. Após a rotura, a medição do comprimento final entre referências,  $L'_u$ , é feita no fragmento mais comprido do provete fracturado, devendo também ser realizada com uma tolerância de  $\pm 0,5$  mm.

Para que a medição possa ser válida, os limites da zona de medição deverão encontrar-se situados a uma distância de pelo 5  $d_o$  da secção de rotura, e de pelo menos 2,5  $d_o$  da garra mais próxima, em que  $d_o$  representa o diâmetro inicial da zona útil do provete.

De acordo com a norma EN 10002-1 [4], a extensão permanente na força máxima,  $A_g$ , expressa em percentagem, é calculada pela seguinte expressão:

$$A_g = \frac{L'_u - L'_o}{L'_o} \times 100 \quad (1)$$

em que  $L'_u$  representa o comprimento final entre referências após rotura e  $L'_o$  representa o comprimento inicial entre referências.

Por sua vez, a extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ , expressa em percentagem, é calculada pela seguinte expressão [4]:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{E} \times 100 \quad (2)$$

em que  $R_m$  representa a tensão máxima registada no decorrer do ensaio e  $E$  representa o módulo de elasticidade do material.

Em relação a esta matéria, a norma ISO 15630-1 [7] estipula que, para a determinação da extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ , deve ser aplicada a norma ISO 6892-1, com a seguinte modificação.

Se o valor de  $A_{gt}$  for determinado pelo método manual após rotura, deve ser calculado através da seguinte fórmula:

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{2000} \times 100 \quad (3)$$

Neste caso, a medição de  $A_g$  deve ser efectuada no maior dos dois troços do provete, com um comprimento de referência de 100 mm, o mais perto possível da secção de rotura, mas a uma distância desta superior ou igual a 50 mm e a 2  $d_o$ . Esta medição pode ser

considerada inválida se a distância entre a extremidade do comprimento de referência mais afastada da secção de rotura e a garra mais próxima for inferior a ou igual a 20 mm ou a  $d_o$ . Em caso de litígio, a norma ISO 15630-1 [7] estipula que deve ser aplicado o método manual.

Como se pode constatar, existem algumas diferenças entre o método manual de determinação da extensão total na força máxima preconizado nas normas de ensaio de tracção de materiais metálicos EN 10002-1 [1] e EN ISO 6892 [2], e o método manual estipulado na ISO 15630-1 [7], aplicável a varões, fio máquina e fio para betão armado.

O comprimento inicial entre referências  $L'_o$  utilizado pode condicionar o valor da extensão permanente na força máxima,  $A_g$ , uma vez que a distribuição das deformações plásticas ao longo deste comprimento não é, em geral, uniforme. Por outro lado, a localização do segmento do provete onde é feita a medição do comprimento final entre referências,  $L'_u$ , pode também afectar os resultados obtidos, uma vez que os limites da zona (ou zonas) onde foi já iniciado o processo de estirção antes de ocorrer a rotura do provete são difíceis de determinar e, no caso de integrarem, ainda que parcialmente, o comprimento final entre referências, podem alterar significativamente o valor de  $A_g$ .

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS ANALISADOS

Para se compreender a influência do método de ensaio, na determinação da extensão total na força máxima em varões de aço, é importante analisar a variação desta característica com diferentes parâmetros. Assim, foi realizada uma comparação de valores da extensão total na força máxima referentes a varões de aço de diversos tipos, com diferentes diâmetros e fornecidos por vários fabricantes.

Os resultados que a seguir se apresentam foram obtidos em ensaios de tracção realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela Unidade de Produtos Metálicos (UPM) do Laboratório de Ensaios e Metrologia (LNEC-EM), no âmbito dos processos de certificação obrigatória de armaduras de aço para betão armado, no período compreendido entre 2008 e 2013.

A fim de se caracterizar os resultados da extensão total na força máxima obtidos para uma amostra, procedeu-se ao cálculo do respectivo coeficiente de variação, através da relação entre o desvio padrão e a média dos resultados obtidos para a amostra em questão.

$$\text{Coeficiente de variação} = \frac{\text{Desvio-Padrão(amostra)}}{\text{Média(amostra)}} \times 100 \% \quad (4)$$

Nos quadros 1 a 3 apresentam-se os resultados das diferentes análises comparativas efectuadas, em relação à extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ . Na análise da variação desta característica em função do diâmetro do varão (Quadro 2), apenas se consideraram

resultados obtidos para varões de aço da classe A500 NR SD, fornecidos por vários fabricantes. Quanto à análise da variação em função da origem do produto (Quadro 3), consideraram-se apenas os resultados de ensaios de varões de aço da classe A500 NR SD com 12mm de diâmetro, fornecidos por 16 fabricantes diferentes.

É importante referir que os ensaios de tracção de varões de aço, cujos resultados são apresentados nos quadros 1 a 3, foram todos realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e que os valores de  $A_{gt}$  indicados nesses quadros foram todos obtidos com base num único método manual de medição da deformação do provete após rotura.

No caso da variação da extensão total na força máxima em função dos diferentes produtos considerados (Quadro 1), verifica-se que os varões de aço endurecidos a frio (varões A500 ER e rede A500 ER) apresentam um maior coeficiente de variação, em relação aos restantes produtos. Este facto resulta essencialmente do baixo valor de  $A_{gt}$  obtido, em média, nos ensaios deste tipo de produtos, quando comparado com os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de varões de aço laminados a quente. O mesmo acontece quando se comparam os coeficientes de variação de  $A_{gt}$  obtidos para varões de aço laminado a quente de alta ductilidade (A400 NR e A500 NR) com os coeficientes de variação de  $A_{gt}$  obtidos para varões de ductilidade especial (A400 NR SD e A500 NR SD).

Verifica-se também que, no caso das redes electrossoldadas constituídas por varões de aço laminados a quente, os coeficientes de variação de  $A_{gt}$  são superiores aos obtidos para varões de aço da mesma classe de resistência (A500 NR e A500 NR SD). Este facto resulta simultaneamente dos valores médios mais baixos da extensão total na força máxima e da maior dispersão dos valores de  $A_{gt}$ , obtidos nos ensaios de redes electrossoldadas. A maior dispersão destes resultados poderá estar associada, em parte, à influência das soldaduras existentes ao longo do comprimento útil do provete, entre o varão ensaiado e outros varões da malha, transversais ao varão ensaiado. Estas soldaduras poderão, nalguns casos, fragilizar o aço do varão ensaiado, diminuindo a sua extensão total na força máxima.

Quadro 1. Análise da extensão total na força máxima, por tipo de produto.

Produto	Número de provetes ensaiados	Média (%)	Desvio – Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
Varão A400 NR	320	14,63	2,88	19,71
Varão A500 NR	585	10,83	1,90	17,52
Varão A400 NR SD	1105	15,85	1,91	12,07
Varão A500 NR SD	2328	11,29	1,93	17,06
Varão A500 ER	419	4,13	1,38	33,49
Rede A500 ER	614	4,38	1,43	32,68
Rede A500 NR	139	8,00	2,42	30,25
Rede A500 NR SD	320	9,61	2,46	25,60



No caso da análise da extensão total na força máxima, por diâmetro, em varões de aço da classe A500 NR SD fornecidos por vários fabricantes (Quadro 2), não se consegue identificar uma dependência nítida dos valores desta característica relativamente ao diâmetro do varão.

Quadro 2. Análise da extensão total na força máxima, por diâmetro, em varões de aço da classe A500 NR SD.

Diâmetro (mm)	Número de provetes ensaiados	Média (%)	Desvio – Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
6	28	10,13	2,27	22,44
8	261	10,70	1,83	17,07
10	316	11,68	2,03	17,39
12	537	11,49	2,10	18,32
14	10	11,06	1,34	12,09
16	449	11,19	1,83	16,37
20	253	11,54	1,45	12,55
25	272	10,94	1,91	17,46
32	143	10,64	1,55	14,60
40	50	13,05	1,29	9,88

Apesar de as dispersões dos resultados dos ensaios das diferentes amostras serem significativas, os respectivos coeficientes de variação só não são mais expressivos devido aos valores médios elevados de  $A_{gt}$ , relativos a cada uma das amostras.

No entanto, verifica-se que em 7 dos 10 diâmetros analisados existe uma redução do desvio-padrão em relação ao valor 1,93 %, obtido para o conjunto dos varões de aço da classe A500 NR SD (ver Quadro 1), comprovando-se que existe uma redução da dispersão dos valores da extensão total na força máxima no caso de se considerarem somente os resultados referentes a cada um destes 7 diâmetros.

No caso de se considerarem apenas varões de aço da classe A500 NR SD com 12 mm de diâmetro, fornecidos por 16 fabricantes diferentes (Quadro 3), a análise dos resultados obtidos permite verificar que, em geral, os coeficientes de variação são inferiores aos apresentados nos quadros anteriores. Este facto resulta principalmente dos menores valores do desvio-padrão obtidos para cada amostra considerada no Quadro 3.

Os coeficientes de variação apresentados no Quadro 2 e no Quadro 3 indiciam, antes de mais, que a variação do diâmetro dos varões aumenta a dispersão dos resultados obtidos. Por outro lado, os resultados apresentados no Quadro 3 mostram que a origem do varão também afecta de modo diferente as suas características, condicionando a dispersão dos resultados obtidos na determinação da extensão total na força máxima.

Quadro 3. Análise da extensão total na força máxima, por fabricante, em varões de aço da classe A500 NR SD com 12mm de diâmetro.

Fabricante	Número de provetes ensaiados	Média (%)	Desvio – Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
F1	22	11,13	2,06	18,46
F2	40	12,27	1,20	9,79
F3	12	12,47	1,00	8,06
F4	13	12,41	1,10	8,84
F5	8	13,36	1,35	10,08
F6	20	13,76	1,02	7,40
F7	10	13,80	1,60	11,62
F8	20	12,29	1,47	11,95
F9	10	11,63	0,88	7,53
F10	60	12,82	1,16	9,04
F11	57	10,84	2,35	21,70
F12	30	10,50	1,76	16,74
F13	53	12,42	1,47	11,86
F14	89	10,67	1,98	18,52
F15	10	11,84	1,05	8,84
F16	51	8,66	1,29	14,90

#### 4. INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE ENSAIO

As diferenças importantes observadas entre os coeficientes de variação referentes a amostras fornecidas por diferentes produtores indicam que, para além do tipo de produto e do diâmetro do varão, existem outras fontes de incerteza na determinação dos valores da extensão total na força máxima que são alheias ao método de ensaio utilizado, que, como foi já referido, foi sempre o mesmo na aquisição dos resultados apresentados nos quadros 1 a 3.

Ainda assim, como se pode observar através dos coeficientes de variação referentes a cada uma das amostras indicadas no Quadro 3, existe uma dispersão de resultados significativa, associada ao método de ensaio utilizado, que influencia os resultados globais obtidos na determinação da extensão total na força máxima.

De acordo com um estudo realizado no LNEC [9], relativo à avaliação das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tracção, foram identificadas várias fontes de incerteza que afectam os valores da extensão total na força máxima, obtidos através deste tipo de ensaio, tais como:

- Heterogeneidade do material ao longo de um provete ou entre diferentes provetes;

- 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 tracção;
- Posição do provete nas garras da máquina;
- Verticalidade do provete;
- Operador do ensaio;
- Velocidade de ensaio;
- Método de determinação dos valores da extensão total na força máxima;
- Determinação da tensão de rotura,  $R_m$ ;
- Medição dos alongamentos;
- Zona de medição dos alongamentos.

Algumas destas fontes são mais relevantes que outras no cálculo da incerteza expandida associada ao valor da extensão total na força máxima, obtido de acordo com um determinado método de ensaio.

Com o intuito de se analisar a influência do método de ensaio na determinação da extensão total na força máxima, foram comparados os valores desta característica, obtidos por diferentes métodos e entidades.

Para esse efeito consideraram-se os valores da extensão total na força máxima obtidos pelo LNEC e por um fabricante, para amostras de 10 provetes de varões de aço da classe A500 NR SD com 16 mm de diâmetro, pertencentes a um mesmo lote de produção (Quadro 4). No caso dos resultados dos ensaios realizados pelo LNEC, apresentam-se os valores da extensão total na força máxima determinados, num mesmo provete, através da medição manual da deformação do provete após rotura (conforme descrito na subsecção 2.3) e da medição automática através de um extensómetro com uma base de 100 mm. Cada um dos valores obtidos pelo fabricante foi medido sobre um provete adjacente recolhido do mesmo varão que o provete ensaiado pelo LNEC.

Os resultados obtidos pelo LNEC, através dos dois métodos anteriormente referidos, e pelo fabricante, em provetes retirados do mesmo varão, são comparados no Quadro 4, verificando-se que estes resultados apresentam diferenças significativas.

Constata-se, por exemplo, uma diferença importante e sistemática entre os resultados obtidos pelo LNEC através de cada um dos dois métodos, sendo que os valores obtidos através do método manual de medição da deformação do provete após rotura são sempre superiores aos valores registados pelo extensómetro. Tendo em conta que os valores registados pelo LNEC para um mesmo provete foram obtidos através do mesmo ensaio de tracção, consegue-se perceber que a escolha do método de determinação do valor de  $A_{gt}$  tem uma influência relevante sobre os resultados obtidos.

Quadro 4. Valores da extensão total na força máxima  $A_{gt}$  (%) obtidos por diferentes métodos de ensaio para varões de aço da classe A500 NR SD, com 16 mm de diâmetro.

Varão	LNEC		Fabricante (%)
	Método		
	Extensómetro (%)	Manual (%)	
1	8,4	9,6	10,6
2	7,6	9,4	10,2
3	8,6	10,4	10,3
4	8,0	9,9	10,6
5	7,2	9,4	10,4
6	6,8	7,9	10,8
7	7,5	8,7	10,8
8	8,0	9,2	10,6
9	9,0	10,6	10,7
10	9,2	8,6	11,3
Média	8,0	9,4	10,6
Desvio - Padrão	0,78	0,83	0,31

Verifica-se também uma diferença significativa entre os resultados obtidos pelo LNEC e pelo fabricante, nos ensaios de provetes provenientes de um mesmo varão. Embora, neste caso, se desconheça o método de determinação dos valores de  $A_{gt}$  utilizado pelo fabricante, conclui-se que estas diferenças resultam essencialmente das incertezas associadas ao método utilizado.

Com efeito, supõe-se que a incerteza dos resultados associada à amostra não será neste caso muito significativa, atendendo a que os varões de aço ensaiados pelo LNEC e pelo fabricante provêm de um mesmo lote, tendo por isso a mesma origem, classe de resistência e diâmetro. Considera-se, por isso, que as diferenças entre os resultados apresentados no Quadro 4 são devidas sobretudo às fontes de incerteza associadas ao ensaio, anteriormente referidas, e à utilização de diferentes métodos de determinação da extensão total na força máxima.

Actualmente existem bastantes dúvidas quanto às vantagens e desvantagens relativas dos dois métodos utilizados (método de medição manual ou por extensómetro) para determinar a extensão total na força máxima, atendendo a que existem fontes de incerteza específicas associadas a cada um destes métodos.

No caso da medição por extensómetro, é necessário ter em conta vários factores que condicionam os resultados obtidos, tais como o comprimento da base do extensómetro e o seu posicionamento no provete em relação à secção de rotura.

Como já foi anteriormente referido, a norma ISO 15630-1 [7] estipula que, em caso de litígio, deve ser considerado o método de determinação manual em detrimento da medição por extensómetro.

Porém, o próprio método de medição manual é também afectado por uma série de factores que influenciam o valor da extensão total na força máxima. Entre as diferentes fontes de incerteza associadas a este método destaca-se, por exemplo, a localização, relativamente à secção de rotura, do troço de varão onde é medido o comprimento final entre referências.

Sabe-se que, frequentemente, a deformação de um provete de varão de aço durante um ensaio de tracção 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 tracção, o processo de estricção do varão possa ter sido iniciado em diferentes secções transversais do varão, para além daquela onde ocorre a sua rotura. Ou seja, se uma destas secções se localizar no interior do comprimento final entre referências utilizado,  $L'_u$ , o valor de  $A_{gt}$  pode ser afectado pelas deformações ocorridas ao nível dessa secção, durante o seu processo de estricção. Além disso, a proximidade do comprimento final  $L'_u$  de uma zona perturbada pela influência de uma das amarrações do provete, ou pela estricção na vizinhança da secção de rotura do provete, pode também afectar a determinação do valor da extensão total na força máxima.

Por outro lado, estes factores poderão igualmente afectar a determinação do valor de  $A_{gt}$  obtido através da medição por extensómetro. Neste caso, as medições efectuadas encontram-se condicionadas pelo posicionamento do extensómetro no provete, relativamente à secção onde ocorre a rotura, cuja localização é desconhecida *a priori*.

Já no caso do método de medição manual, se o comprimento do provete for suficientemente longo, e se as marcas de referência tiverem sido apostas ao longo de todo o seu comprimento, existe a possibilidade de testar diferentes posicionamentos do comprimento final  $L'_u$ , de modo a se tentar diminuir a influência dos factores atrás referidos.

## 5. CONCLUSÕES

A ductilidade do aço dos varões para betão armado é uma das principais características deste produto, com particular relevância nos casos em que esses varões são aplicados em estruturas potencialmente sujeitas aos efeitos de acções sísmicas. A sua avaliação é habitualmente efectuada pela determinação da extensão total na força máxima,  $A_{gt}$ , através de um ensaio de tracção.

O presente trabalho apresenta a análise de um vasto conjunto de valores da extensão total na força máxima de aços de varões para betão armado, obtidos no âmbito de acções de certificação destes aços realizadas pelo LNEC.

Os resultados analisados apresentam uma dispersão elevada, mostrando que a avaliação desta característica,  $A_{gt}$ , é afectada por uma grande diversidade de factores. Alguns destes

factores encontram-se relacionados com os processos de fabrico e de amostragem destes produtos, e com a heterogeneidade das características dos próprios varões. Por outro lado, os valores de  $A_{gt}$  podem também ser fortemente afectados pelo método utilizado na sua avaliação, cuja influência se pode revelar bastante mais significativa que no caso de outras características mecânicas do aço também determinadas através do ensaio de tracção.

A análise dos resultados apresentados permitiu observar diferenças significativas entre os resultados da extensão total na força máxima, obtidos: i) para diferentes tipos de produto (varões simples e varões retirados de redes electrossoldadas), ii) para diferentes classes de resistência do mesmo tipo de produto, iii) para diferentes diâmetros de varões da mesma classe de resistência, e iv) para varões da mesma classe, com o mesmo diâmetro, fornecidos por diferentes fabricantes.

Por outro lado verifica-se que, no caso de varões recolhidos de um mesmo lote da produção, com o mesmo diâmetro e classe de resistência, a dispersão dos resultados é menor. Este facto comprova que qualquer uma das fontes de incerteza atrás referidas, alheias ao método de ensaio utilizado, tem uma influência importante sobre a variação dos valores da extensão total na força máxima.

No entanto, verificam-se ainda variações significativas nos valores da extensão total na força máxima de varões do mesmo tipo e com a mesma origem, as quais, em geral, resultam de incertezas associadas ao ensaio. Entre as várias fontes de incerteza identificadas neste trabalho destacam-se as associadas à geometria dos provetes e à sua fixação e posicionamento na máquina de ensaio, aos equipamentos de ensaio e de medição, à utilização destes equipamentos pelos respectivos operadores, e aos métodos utilizados na medição das deformações correspondentes à força máxima atingida pelo provete durante o ensaio.

Em particular, observaram-se também diferenças importantes entre os valores da extensão total na força máxima obtidos para varões com o mesmo diâmetro e classe de resistência, recolhidos de um mesmo lote da produção, quando ensaiados por entidades diferentes utilizando o mesmo método de medição, ou quando ensaiados pela mesma entidade utilizando métodos de medição diferentes, através do recurso a um extensómetro, ou da medição manual da deformação plástica do provete após a sua rotura. As principais fontes de incerteza associadas a cada um destes métodos foram também identificadas e descritas neste trabalho.

Uma vez que as fontes de incerteza alheias ao método de ensaio são mais difíceis de controlar, após a colocação do produto no mercado, pelo facto de dependerem de factores inerentes ao tipo de produto em questão e ao seu processo produtivo, é aconselhável investir na redução das incertezas associadas ao ensaio de tracção e, em particular, ao método de medição das deformações do provete.

Nesse sentido, é importante proceder a novos trabalhos de investigação para melhor identificar e compreender a influência das fontes de incerteza associadas aos métodos de medição utilizados.

Actualmente está em curso no LNEC um estudo com o objectivo de estabelecer uma correlação entre as causas e consequências destas fontes de incerteza, e de elaborar procedimentos pormenorizados de ensaio e de medição que permitam minorar os seus efeitos, na dispersão dos valores da extensão total na força máxima em varões de aço para betão armado.

Além disso, espera-se poder contribuir para a eliminação das discordâncias actualmente existentes entre disposições de normas diferentes, atrás referidas, promovendo, deste modo, a harmonização dos documentos normativos existentes sobre esta matéria, e a melhoria dos critérios de controlo utilizados no âmbito da certificação dos varões para betão armado.

## REFERÊNCIAS

- [1] ISO 6892-1:2009 “Matériaux métalliques — Essai de traction — Partie 1: Méthode d'essai à température ambiante”, ISO – International Organization for Standardization, 2009, 67 p.
- [2] EN ISO 6892-1:2009 “Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2009)”, CEN – Comité Européen de Normalisation, August 2009, 3+67 p.
- [3] NP EN ISO 6892-1:2012 “Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. (ISO 6892-1:2009)”, IPQ - Instituto Português da Qualidade, Janeiro de 2012, 75 p.
- [4] EN 10002-1:2001 “Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature”, CEN – Comité Européen de Normalisation, July 2001, 56 p.
- [5] NP EN 10002-1:2006 “Materiais metálicos. Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente”, IPQ - Instituto Português da Qualidade, Agosto de 2006, 60 p.
- [6] ISO 15630-1:2002 “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire”, ISO – International Organization for Standardization, 2002, 15 p.
- [7] ISO 15630-1:2010 “Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire”, ISO – International Organization for Standardization, 2010, 20 p.
- [8] 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 (ISO 15630-1:2010), IPQ - Instituto Português da Qualidade, Setembro de 2012, 27 p.
- [9] André J., Baptista A.M. “Avaliação das incertezas associadas aos resultados dos ensaios de tracção realizados no laboratório de ensaios de produtos metálicos”, Relatório nº 331/2009, LNEC, 2009, 173 p.