

## **Tensão de rotura de aços de varões A400 para betão armado. Influência da origem dos varões na sua distribuição estatística.**

**António Manuel Baptista**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, e-mail: ambaptista@lnec.pt*

**João Filipe**

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, e-mail: jfilipe@lnec.pt*

### **Resumo**

A tensão de rotura à tração dos aços dos varões para betão armado constitui uma das propriedades mecânicas consideradas na análise do comportamento das estruturas de betão armado.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão de rotura dos aços dos varões para betão armado obtidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil ao longo de 25 anos, no âmbito do controlo periódico de varões da classe A400 decorrente das Ações de Acompanhamento da Certificação destes produtos. Com base nestes valores, são indicadas as distribuições globais da tensão de rotura para cada tipo de varões controlados (A400 NR e A400 NR SD).

No entanto, a tensão de rotura pode apresentar variações significativas, que dependem do tipo de varão, da composição química do aço, da origem dos varões, do diâmetro dos varões e dos métodos de ensaio utilizados na sua determinação, por exemplo. Os varões de aço utilizados numa obra específica provêm frequentemente de um único fabricante e de um número limitado de lotes de produção. Por este motivo, numa determinada construção ou até numa parte dela, a distribuição dos valores da tensão de rotura pode diferir da distribuição global referente a esse tipo de aço, atrás referida.

A fim de se avaliar a influência da origem dos varões, este artigo apresenta também diversos exemplos de distribuições de resultados correspondentes a um único fabricante de cada um dos tipos de varões analisados. São também apresentados os valores dos parâmetros estatísticos das distribuições individuais de resultados de todos os fabricantes dos varões analisados. Esta informação fornece uma noção adicional e mais realista sobre a resistência dos varões A400 certificados em Portugal. Poderá, por isso, constituir uma ferramenta útil para a avaliação futura das construções em betão armado realizadas em Portugal desde o início do século XXI até à data atual.

**Palavras-chave:** Betão armado; Varões de aço; Tensão de rotura; Distribuição estatística

## 1 INTRODUÇÃO

A tensão de rotura à tração dos aços dos varões para betão armado,  $f_t$ , constitui uma das propriedades mecânicas consideradas na análise do comportamento das estruturas de betão armado. De acordo com o Eurocódigo 2 [1], o seu valor característico, utilizado nos cálculos de verificação da segurança de uma estrutura de betão armado, refere-se às armaduras utilizadas nessa estrutura em particular, enquanto que os valores característicos das propriedades mecânicas dos aços dos varões colocados no mercado são garantidos pelo seu fabricante com base no controlo de qualidade a longo prazo da produção desses varões. No entanto, considera-se que os métodos de avaliação e verificação utilizados no controlo de qualidade dos varões são adequados para suportar uma estimativa conservativa dos valores característicos das propriedades mecânicas dos aços dos varões utilizados numa dada estrutura, em particular.

Salienta-se que a aplicação de produtos de aço em construções de betão armado em Portugal depende da sua prévia Classificação pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e da sua Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade [2], [3]. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação.

Este controlo periódico envolve, entre outras, a análise dos valores da tensão de rotura,  $R_m$ , obtidos através de ensaios de tração de amostras dos varões certificados em Portugal. Os valores da tensão de rotura,  $R_m$ , são obtidos no âmbito dos ensaios de verificação do produto, realizados pelo fabricante dos varões, e dos ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC.

Na falta de informação experimental específica sobre a distribuição estatística da tensão de rotura à tração,  $f_t$ , referente às armaduras de aço utilizadas numa dada estrutura, torna-se útil conhecer a distribuição estatística global da tensão de rotura,  $R_m$ , no conjunto dos varões de aço de um dado tipo controlados num determinado período em Portugal. Com o objetivo de proporcionar este tipo de informação, o presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores de  $R_m$  obtidos pelo LNEC, ao longo de 25 anos, no âmbito do controlo periódico dos varões da classe de resistência A400.

No entanto, importa referir que a tensão de rotura,  $R_m$ , destes varões pode apresentar variações significativas, que dependem do tipo de varão (A400 NR ou A400 NR SD), da composição química do aço, da origem dos varões (processos de fabrico utilizados e sua evolução ao longo do tempo), do diâmetro dos varões e dos métodos de ensaio utilizados na sua determinação, por exemplo.

Os varões de aço utilizados numa obra específica provêm frequentemente de um único fabricante e de um número limitado de lotes de produção. Por este motivo, numa determinada construção ou até numa parte dela, a distribuição dos valores da tensão de rotura pode diferir significativamente da distribuição global referente a esse tipo de aço. A fim de se avaliar a influência da origem dos varões, são apresentados exemplos de distribuições de resultados correspondentes a um único fabricante de cada um dos tipos de varões analisados.

## 2 DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS DOS VALORES DA TENSÃO DE ROTURA

Os resultados gerais da análise estatística realizada aos valores da tensão de rotura,  $R_m$ , são apresentados nas Figs. 1 a 4. A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais parâmetros estatísticos das distribuições globais dos valores desta propriedade,  $R_m$ , apresentadas nestas figuras.

As Figs. 1 e 3 apresentam histogramas com as distribuições estatísticas do conjunto de resultados de  $R_m$  obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC, entre os anos de 1994 e de 2019, para todos os diâmetros de varões controlados e previstos nas Especificações LNEC E 449 [4] e LNEC E 455 [5], aplicáveis aos varões A400 NR e A400 NR SD respetivamente. Em cada uma destas figuras são também indicados os valores da média ( $\bar{x}$ ) e do desvio-padrão ( $\sigma$ ) da distribuição estatística em questão, bem como a dimensão da amostra analisada ( $n$ ) e o período em que os resultados foram obtidos.

Os histogramas das Figs. 2 e 4 apresentam, separadamente, as distribuições estatísticas dos resultados de  $R_m$  obtidos através dos ensaios de verificação do produto, realizados pelo fabricante dos varões, ou através dos ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC, respetivamente. Em cada uma destas figuras são também apresentados os valores médios de cada uma destas distribuições estatísticas,  $\bar{x}(\text{Fab})$  e  $\bar{x}(\text{LNEC})$ .

Tabela 1: Número de resultados analisados ( $n$ ) e respetivos valores médios ( $\bar{x}$ ) e desvios-padrão ( $\sigma$ )

Tipo de varão	Fab+LNEC			Fabricantes			LNEC		
	$n$	$\bar{x}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$n$	$\bar{x}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	$n$	$\bar{x}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
A400 NR	9174	590,4	30,4	4557	591,6	30,0	4617	589,3	30,7
A400 NR SD	10799	571,2	18,1	5380	573,4	17,4	5419	569,0	18,5

A comparação entre os histogramas das Figs. 1 e 3 mostra que as distribuições estatísticas da tensão de rotura,  $R_m$ , variam com o tipo de varões de aço em questão. A distribuição correspondente aos varões de aço de alta ductilidade A400 NR apresenta uma dispersão maior ( $\sigma=30,4$  N/mm<sup>2</sup>) e valores de  $R_m$  mais elevados ( $\bar{x}=590,4$  N/mm<sup>2</sup>) que a dos varões de ductilidade especial A400 NR SD. Os coeficientes de variação,  $\rho$ , das distribuições estatísticas dos valores de  $R_m$  obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC são  $\rho=5,14\%$  e  $\rho=3,16\%$ , para os varões dos tipos A400 NR e A400 NR SD, respetivamente.

A comparação entre os histogramas das Figs. 2 e 4 mostra que as distribuições estatísticas da tensão de rotura,  $R_m$ , correspondentes aos resultados obtidos pelos fabricantes são semelhantes às distribuições dos resultados de  $R_m$  obtidos pelo LNEC. Os valores obtidos pelos fabricantes são ligeiramente superiores aos do LNEC, mas as pequenas diferenças entre os respetivos valores médios (inferiores a 0,4% e a 0,8%, nos casos dos varões A400 NR e A400 NR SD respetivamente), poderão justificar-se pelas inevitáveis incertezas associadas aos equipamentos e às metodologias de ensaio utilizados. Este facto indicia que, no seu conjunto, os resultados obtidos através dos ensaios de verificação, realizados pelos fabricantes, são coerentes com os resultados obtidos nos ensaios de acompanhamento, realizados pelo LNEC. Esta conclusão é corroborada pelos valores médios e pelos desvios-padrão apresentados na Tabela 1, referentes aos resultados dos fabricantes e do LNEC para cada tipo de varão.

Acresce que, no âmbito de um outro estudo estatístico realizado no LNEC [6], sobre a distribuição estatística da tensão de cedência do aço destes varões, foi possível concluir que os resultados obtidos pelo fabricante e pelo LNEC no ensaio de provetes provenientes de um mesmo varão laminado a quente são em geral semelhantes; o valor médio da relação entre estes dois valores, no conjunto dos resultados obtidos ao longo de mais de duas décadas, é muito próximo de 1,0 e, em cerca de 90% dos casos, a diferença relativa entre valores obtidos em provetes de um mesmo varão é inferior a 4%.

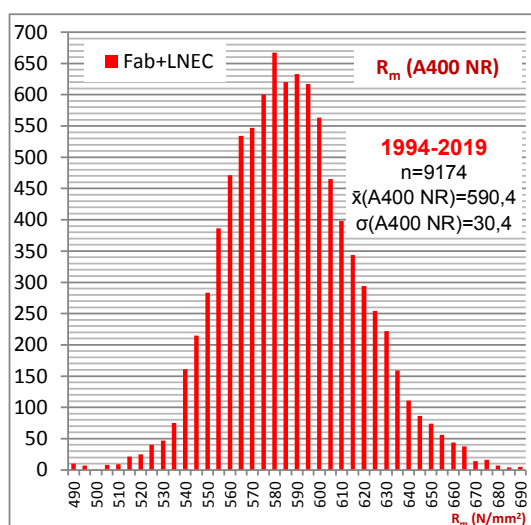


Figura 1. Resultados de  $R_m$  ( $N/mm^2$ ), obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC para varões A400 NR

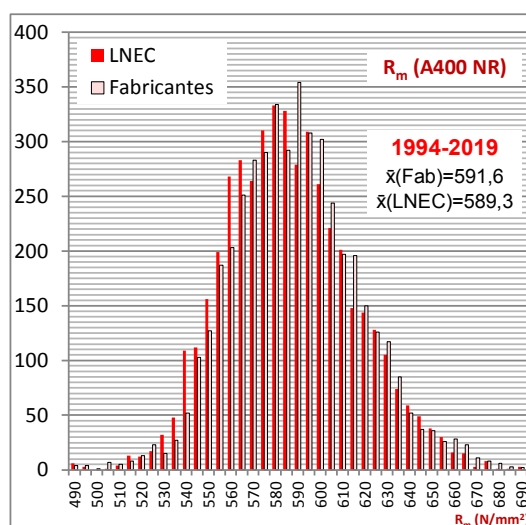


Figura 2. Resultados de  $R_m$  ( $N/mm^2$ ), obtidos pelos fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR

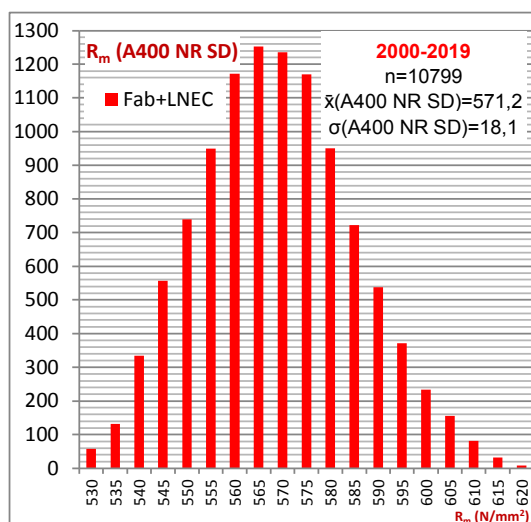


Figura 3. Resultados de  $R_m$  ( $N/mm^2$ ), obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC para varões A400 NR SD

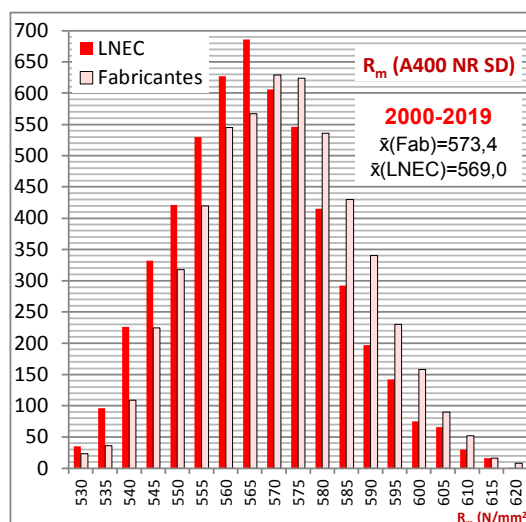


Figura 4. Resultados de  $R_m$  ( $N/mm^2$ ), obtidos pelos fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR SD

Os valores característicos  $R_{m,k5\%}$  referentes aos quantilhos de 5%, calculados com um grau de confiança de 90% a partir das distribuições estatísticas da tensão de rotura, apresentadas nas Figs. 1 a 4, são indicados na Tabela 2. É possível constatar que os valores característicos  $R_{m,k5\%}$  dos varões A400 NR e A400 NR SD são idênticos, apesar de os valores médios dos primeiros serem superiores aos dos últimos. Este facto resulta da maior dispersão dos resultados obtidos para os varões A400 NR.

Tabela 2: Valores característicos  $R_{m,k5\%}$  ( $N/mm^2$ ), referentes aos quantilhos de 5% da tensão de rotura

	Fab+LNEC		Fabricantes		LNEC	
	A400 NR	A400 NR SD	A400 NR	A400 NR SD	A400 NR	A400 NR SD
$R_{m,k5\%}$	539,8	541,1	541,4	544,3	537,9	538,1

Verifica-se também que todos os valores característicos  $R_{m,k5\%}$  indicados na Tabela 2, referentes aos varões A400 NR, respeitam o limite mínimo de  $460 \text{ N/mm}^2$  estipulado na Especificação LNEC E 449 [4], aplicável a estes varões. No caso dos varões A400 NR SD, a Especificação LNEC E 455 [5] não impõe um limite mínimo para o valor característico  $R_{m,k5\%}$ ; por outro lado, limita os valores característicos referentes aos quantilhos de 10% e de 90% da relação entre os valores da tensão de rotura e da tensão de cedência,  $R_m/R_e$ , obtidos num mesmo ensaio de tração, a um limite mínimo de 1,15 e a um limite máximo de 1,35, respetivamente.

No âmbito de outro estudo estatístico realizado no LNEC [7], sobre a distribuição estatística da relação  $R_m/R_e$ , foi possível concluir que os referidos valores característicos de 10% e de 90%, calculados com um grau de confiança de 90% a partir das distribuições de valores da relação  $R_m/R_e$  obtidas pelos fabricantes e pelo LNEC para varões A400 NR SD, respeitam os limites mínimo e máximo atrás indicados.

### 3 INFLUÊNCIA DA ORIGEM DOS VARÕES

Os resultados apresentados na secção anterior incluem todos os diâmetros de varões produzidos por todos os fabricantes controlados entre 1994 e 2019. No seu conjunto, estes resultados satisfazem as exigências estipuladas nas Especificações LNEC aplicáveis a cada um dos tipos de varões [4], [5].

Entretanto, foi já referido que a tensão de rotura,  $R_m$ , pode apresentar variações significativas que dependem de vários fatores. As distribuições estatísticas apresentadas nas Figs. 1 a 4 são distribuições globais que resultam da soma de distribuições parcelares que correspondem a casos particulares de cada um desses fatores, tais como as distribuições correspondentes: i) a varões do mesmo tipo provenientes do mesmo fabricante, ii) a varões do mesmo tipo com o mesmo diâmetro nominal, ou iii) a varões do mesmo tipo controlados no mesmo ano, por exemplo.

A fim de se observar a influência da origem dos varões, as Figs. 5 e 6 apresentam exemplos de distribuições de resultados de  $R_m$  correspondentes a varões A400 NR e A400 NR SD produzidos por um único fabricante. Estes resultados foram obtidos em ensaios realizados pelo fabricante dos varões e pelo LNEC.

A Fig. 5, por exemplo, mostra que as distribuições de resultados correspondentes aos varões do tipo A400 NR produzidos pelos Fabricantes F010, F031 e F033 são bastante diferentes entre si. O valor médio da distribuição referente ao F010 é semelhante ao do F033, mas o seu desvio-padrão é bastante inferior ao deste último. Por esse motivo, o valor característico ( $R_{m,k5\%}=564 \text{ N/mm}^2$ ) da distribuição referente ao F010 é bastante superior ao da distribuição referente ao F033 ( $R_{m,k5\%}=525 \text{ N/mm}^2$ ).

Por outro lado, o desvio-padrão da distribuição referente ao F031 é idêntico ao do F033, mas o seu valor médio é bastante inferior ao deste fabricante. Por isso, o valor característico ( $R_{m,k5\%}=509 \text{ N/mm}^2$ ) da distribuição referente ao F031 é bastante inferior ao da distribuição referente ao F033. Todos estes valores de  $R_{m,k5\%}$  satisfazem o limite mínimo de  $460 \text{ N/mm}^2$  estipulado na Especificação LNEC E 449 [4], embora os dois últimos sejam inferiores ao valor característico ( $R_{m,k5\%}=540 \text{ N/mm}^2$ ) do conjunto dos resultados referentes a varões A400 NR, recolhidos entre 1994 e 2019 (Fig. 1 e Tabela 2).

A Fig. 6 apresenta as distribuições de resultados correspondentes aos varões do tipo A400 NR SD, de ductilidade especial, produzidos pelos Fabricantes F010, F011 e F030. É possível constatar, antes de mais, que todas estas distribuições apresentam desvios-padrão inferiores aos das distribuições referentes a varões A400 NR, apresentadas nas Figs. 1 e 5. Por sua vez, os respetivos valores médios são inferiores aos das distribuições referentes a varões A400 NR.

O valor médio da distribuição referente ao F010 é semelhante ao do F011, mas o seu desvio-padrão é bastante inferior ao deste último. Por outro lado, o desvio-padrão da distribuição referente ao F030 é semelhante ao do F011, mas o seu valor médio é inferior ao deste fabricante.

O valor médio e o desvio-padrão da distribuição de resultados referente ao Fabricante F011 são os que mais se aproximam dos da distribuição global dos resultados referentes a varões A400 NR SD (Tabela 1). Consequentemente, o seu valor característico ( $R_{m,k5\%}=542 \text{ N/mm}^2$ ) é próximo do da distribuição global dos resultados referentes a varões A400 NR SD, apresentada na Fig. 3 ( $R_{m,k5\%}=541 \text{ N/mm}^2$ ). O valor característico ( $R_{m,k5\%}=559 \text{ N/mm}^2$ ) da distribuição referente ao F010 é bastante superior a esse valor. Por sua vez, o valor característico ( $R_{m,k5\%}=531 \text{ N/mm}^2$ ) da distribuição referente ao F030 é o mais baixo de todas as distribuições apresentadas na Fig. 6.

As Figs. 5 e 6 mostram também que a elevada dispersão de algumas das distribuições de resultados apresentadas resultam do facto de estas englobarem várias distribuições parcelares distintas que indiciam a influência particular de outros parâmetros, tais como os já anteriormente referidos (diâmetro dos varões, e variações da produção de um mesmo fabricante ao longo do tempo).

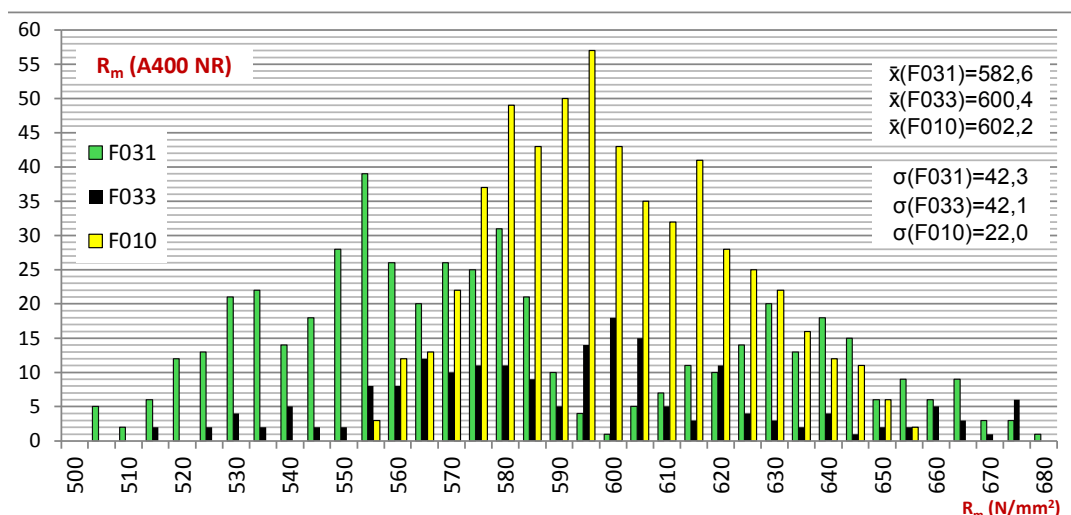


Figura 5. Resultados da tensão de rotura,  $R_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para varões A400 NR provenientes de um único Fabricante (F010, F031 e F033)

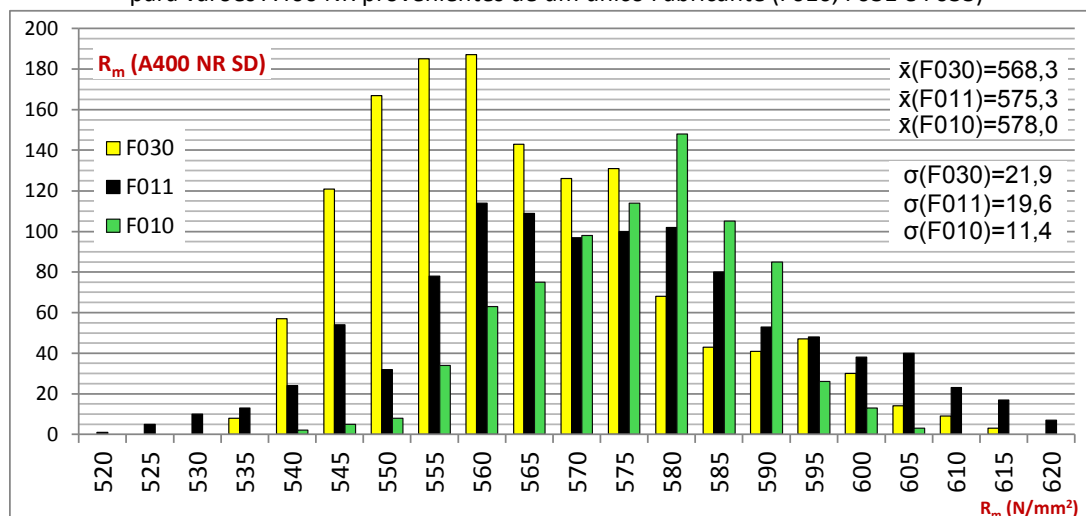


Figura 6. Resultados da tensão de rotura,  $R_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para varões A400 NR SD provenientes de um único Fabricante (F010, F011 e F030)

Estas distribuições parcelares são facilmente observáveis nas distribuições de resultados dos Fabricantes F031 e F033 (Fig. 5), no caso dos varões A400 NR, sendo possível constatar que os seus valores médios individuais serão muito diferentes entre si. Deste modo, apesar de o valor característico da distribuição referente ao F031 ser inferior ao dos outros fabricantes, poderão existir lotes da sua produção, correspondentes a valores particulares dos referidos parâmetros (diâmetro dos varões, por exemplo), com distribuições da tensão de rotura cujos valores característicos serão muito diferentes entre si, sendo alguns deles superiores aos valores característicos das distribuições globais correspondentes a cada um dos outros fabricantes apresentadas na Fig. 5.

No caso dos varões de ductilidade especial A400 NR SD, embora as distribuições globais referentes a cada fabricante (Fig. 6) apresentem dispersões menores que as dos varões A400 NR (Fig. 5), é também possível identificar a existência de distribuições de resultados parcelares, embora estas não se destaquem tanto como no caso dos varões A400 NR. É o caso, por exemplo, das distribuições referentes aos Fabricantes F011 e F030, cujos desvios-padrão são mais elevados.

A fim de proporcionar uma perspetiva global da influência da origem dos varões na distribuição estatística da sua tensão de rotura, para além da comparação pormenorizada relativa a alguns dos fabricantes proporcionada através das Figs. 5 e 6, é apresentada nas Figs. 7 e 8 uma comparação entre os valores médios das distribuições estatísticas dos conjuntos de resultados da tensão de rotura,  $R_m$ , obtidos para cada tipo de varão (A400 NR e A400 NR SD), pelos fabricantes e pelo LNEC, entre os anos de 1994 e de 2019, para todos os diâmetros de varões controlados de um mesmo fabricante. A Fig. 9 mostra uma comparação entre os desvios-padrão das mesmas distribuições estatísticas.

É possível constatar que os valores médios das distribuições de resultados, obtidos pelo Fabricante ou pelo LNEC para os varões desse Fabricante, são em geral semelhantes. No caso dos varões A400 NR as diferenças entre estes valores médios são em geral inferiores a  $6 \text{ N/mm}^2$ , atingindo um valor máximo de  $11 \text{ N/mm}^2$  no caso dos Fabricantes F009, F024 e F033; o seu valor médio é de  $4 \text{ N/mm}^2$ . No caso dos varões A400 NR SD a maioria destas diferenças é inferior a  $7 \text{ N/mm}^2$ , atingindo um valor máximo de  $20 \text{ N/mm}^2$  no caso particular do Fabricante F015; o seu valor médio é de  $6 \text{ N/mm}^2$ .

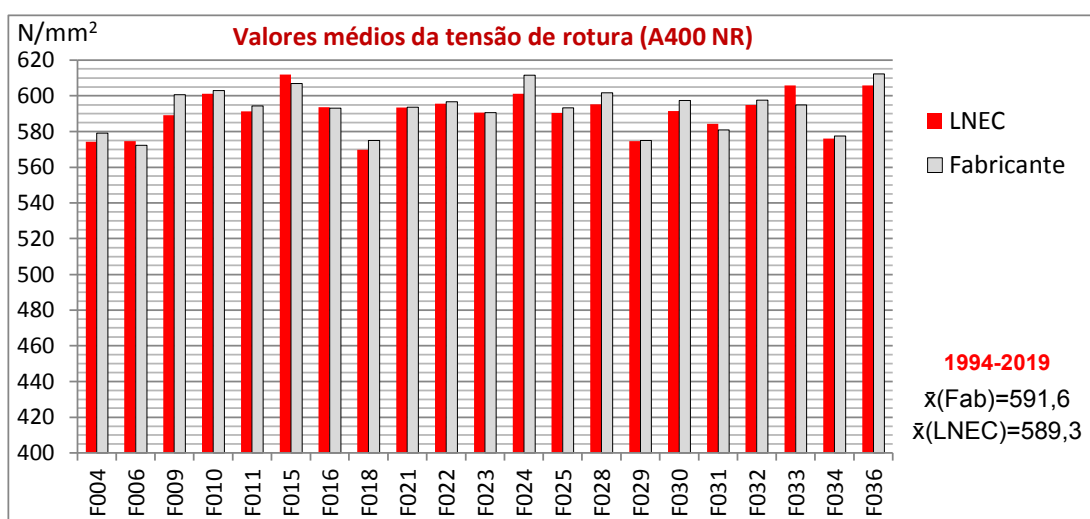


Figura 7. Valores médios da tensão de rotura,  $R_m$  ( $\text{N/mm}^2$ ), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR, em função do respetivo Fabricante

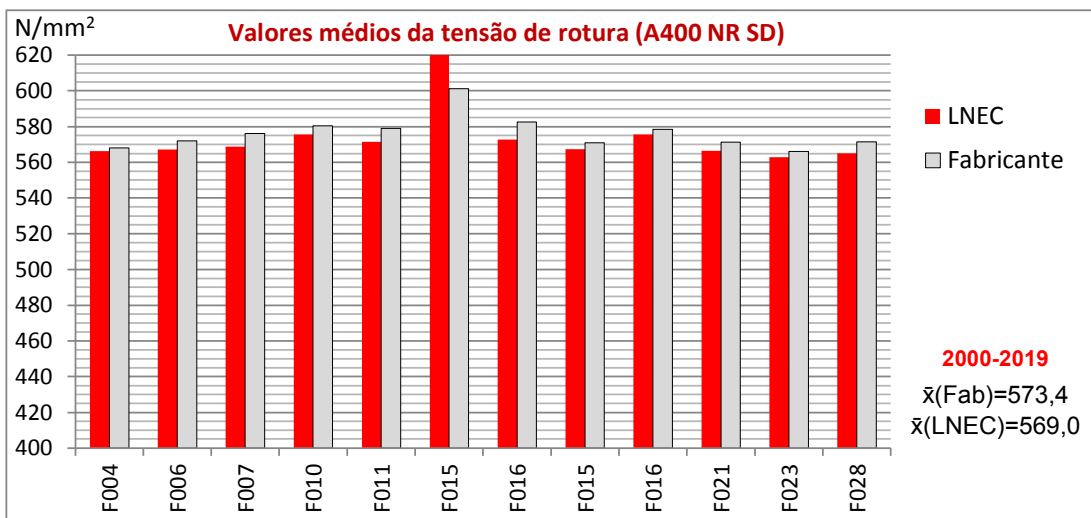


Figura 8. Valores médios da tensão de rotura,  $R_m$  (N/mm<sup>2</sup>), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR SD, em função do respetivo Fabricante

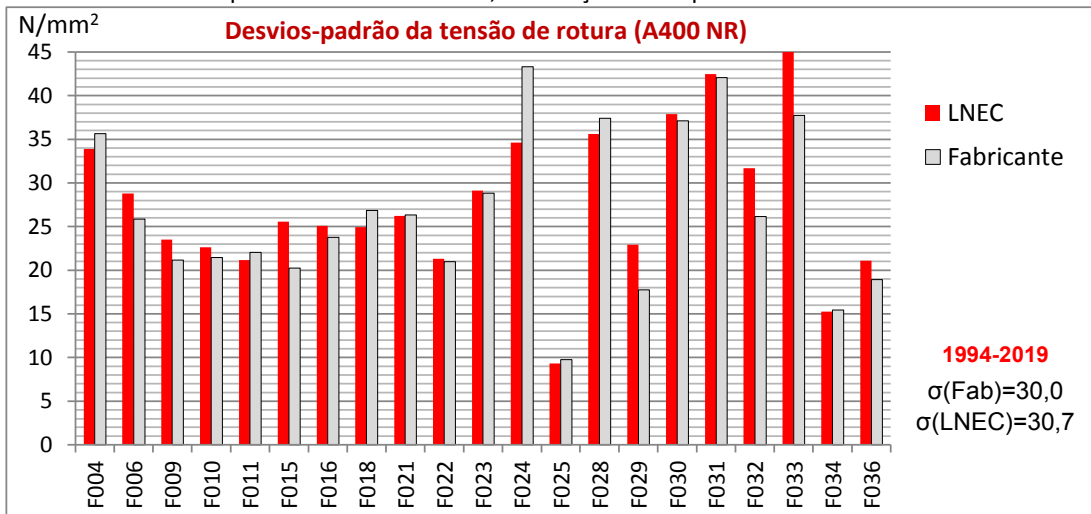


Figura 9. Desvios-padrão da tensão de rotura,  $R_m$  (N/mm<sup>2</sup>), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR, em função do respetivo Fabricante

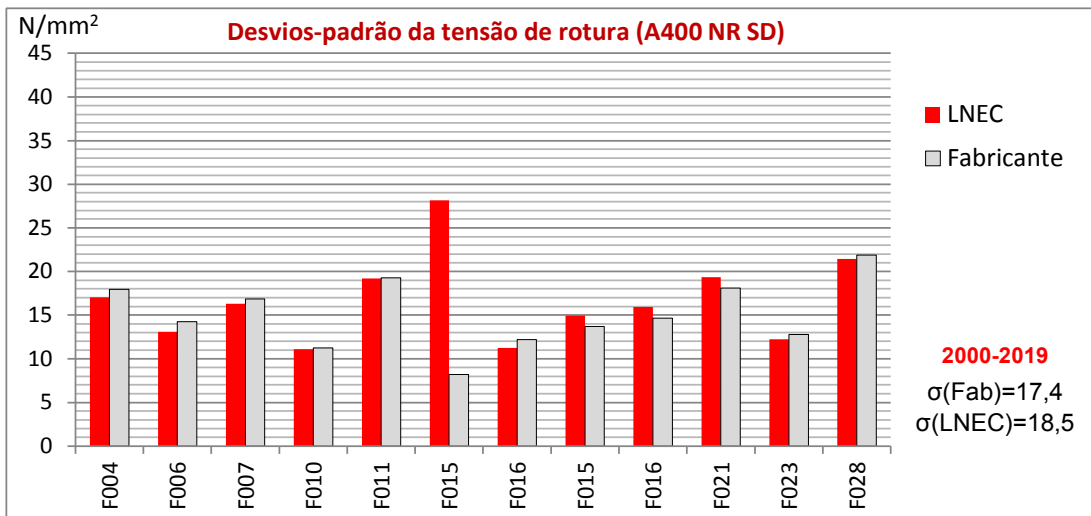


Figura 10. Desvios-padrão da tensão de rotura,  $R_m$  (N/mm<sup>2</sup>), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC para varões A400 NR SD, em função do respetivo Fabricante



Para um mesmo tipo de varão, as diferenças entre valores médios de distribuições de resultados referentes a diferentes fabricantes são frequentes e mais elevadas (Figs. 7 e 8). Estas diferenças atingem cerca de  $40 \text{ N/mm}^2$ , no caso dos varões A400 NR, e cerca de  $50 \text{ N/mm}^2$  no caso dos varões A400 NR SD.

As Figs. 9 e 10 mostram que a dispersão dos resultados é bastante variável, dependendo do fabricante dos varões. No caso dos varões A400 NR os desvios-padrão variam entre  $9 \text{ N/mm}^2$  (F025) e  $46 \text{ N/mm}^2$  (F033). No caso dos varões A400 NR SD os desvios-padrão variam em geral entre  $11 \text{ N/mm}^2$  e  $22 \text{ N/mm}^2$ , com exceção da variação entre  $8 \text{ N/mm}^2$  e  $28 \text{ N/mm}^2$  verificada entre os desvios-padrão dos resultados obtidos pelo Fabricante F015 e pelo LNEC para os varões produzidos por este fabricante.

As diferenças entre os desvios-padrão das distribuições de resultados obtidos pelo Fabricante ou pelo LNEC, para um determinado tipo de varão produzido por esse fabricante, são na generalidade dos casos inferiores a  $5 \text{ N/mm}^2$ , no caso dos varões A400 NR, e inferiores a  $1 \text{ N/mm}^2$  no caso dos varões A400 NR SD, embora no caso particular do Fabricante F015, atrás referido, atinjam  $20 \text{ N/mm}^2$ .

Constata-se assim que, em cada distribuição particular da tensão de rotura, a dispersão dos valores é geralmente maior no caso dos varões A400 NR que no caso dos varões A400 NR SD. As diferenças entre as distribuições da tensão de rotura de varões do mesmo tipo produzidos por diferentes fabricantes também são maiores no caso dos varões A400 NR.

Entretanto, faz-se notar que o valor característico  $R_{m,k5\%}$ , referente ao quantilho de 5% de cada uma das distribuições da tensão de rotura analisadas depende simultaneamente dos respetivos valor médio e desvio-padrão. Os valores mais baixos de  $R_{m,k5\%}$ , referentes a um único fabricante, são da ordem de  $506 \text{ N/mm}^2$ , no caso dos varões A400 NR e de  $528 \text{ N/mm}^2$  no caso dos varões A400 NR SD.

#### 4 CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão de rotura,  $R_m$ , dos varões de aço dos tipos A400 NR e A400 NR SD. As distribuições globais da tensão de rotura,  $R_m$ , referentes a cada um destes tipos de varões, foram obtidas a partir dos resultados experimentais recolhidos pelo LNEC no âmbito do controlo periódico destes varões. Atendendo à elevada dimensão dos conjuntos de resultados analisados para cada tipo de varão (Tabela 1), as conclusões que deles se podem retirar serão, em princípio, aplicáveis à generalidade destes varões de aço utilizados em armaduras para estruturas de betão armado realizadas em Portugal desde o ano de 1994.

Em geral, pode-se afirmar que a origem dos resultados analisados neste estudo, quer eles provenham de ensaios de verificação do produto realizados pelo fabricante dos varões ou de ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC, não afeta significativamente as distribuições estatísticas dos valores de  $R_m$  referentes a qualquer um dos tipos de varão e, conseqüentemente, não condiciona as conclusões estabelecidas neste trabalho.

Os valores médios e os desvios-padrão das distribuições estatísticas globais dos valores de  $R_m$  são sempre mais elevados no caso dos varões de alta ductilidade A400 NR que no caso dos varões de ductilidade especial A400 NR SD. Os valores característicos  $R_{m,k5\%}$ , correspondentes ao quantilho de 5%, calculados com um grau de confiança de 90% a partir das distribuições de resultados referentes aos varões A400 NR, respeitam o limite mínimo de  $460 \text{ N/mm}^2$  estipulado na Especificação LNEC E 449 [4].

No entanto, constata-se que a distribuição estatística da tensão de rotura de cada um dos dois tipos de varões da classe de resistência A400 (A400 NR e A400 NR SD) pode variar de um fabricante para outro, e que os valores médios e os valores característicos destas distribuições podem tomar valores inferiores aos das distribuições globais, apresentados nas Tabelas 1 e 2. Também no caso de distribuições referentes a um único fabricante de um determinado tipo de varão podem ser identificadas diferentes distribuições parcelares, que indiciam a influência adicional de outros parâmetros, tais como o diâmetro dos varões ou variações da produção ao longo do tempo.

Os varões de aço utilizados numa obra específica provêm frequentemente de um único fabricante e de um número limitado de lotes de produção. Sendo assim, numa determinada construção ou até numa parte dela, a distribuição dos valores da tensão de rotura pode diferir significativamente das distribuições globais apresentadas no presente artigo. Por este motivo, nos estudos em que se pretenda recorrer a estimativas mais realistas da distribuição estatística ou dos valores característicos da tensão de rotura, como no caso da avaliação da fiabilidade de uma determinada estrutura ou da segurança de uma construção existente, poderá ser conveniente ter este aspeto em consideração, adotando valores médios, desvios-padrão e valores característicos diferentes dos apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Com o objetivo de ilustrar as diferenças entre as distribuições estatísticas da tensão de rotura de varões provenientes de diferentes origens são apresentados vários exemplos de distribuições referentes a um único fabricante, de um determinado tipo de varão. A fim de se poder tomar em conta a influência da origem dos varões são ainda apresentados os parâmetros estatísticos das distribuições de resultados correspondentes a cada um dos fabricantes de cada um dos tipos de varões analisados.

Esta informação fornece uma noção adicional e mais realista sobre a resistência dos varões de aço da classe A400 certificados em Portugal durante os últimos 25 anos. Poderá, por isso, constituir uma ferramenta útil para a avaliação futura das construções em betão armado realizadas em Portugal desde o início do século XXI até à data atual.

## REFERÊNCIAS

- [1] NP EN 1992-1-1:2010 “Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, 259 p.
- [2] Decreto-Lei nº 128/99, de 21 de abril.
- [3] Decreto-Lei nº 390/2007, de 10 de dezembro.
- [4] Especificação LNEC E 449:2017 “Varões de aço A400 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017.
- [5] Especificação LNEC E 455:2017 “Varões de aço A400 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017.
- [6] Baptista, A. M.; Filipe, J. (2016). “Tensão de cedência dos aços de varões para betão armado. Análise da sua distribuição estatística nas duas últimas décadas”, Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2016, FCTUC, 2016, 10 p.
- [7] Baptista, A. M.; Filipe, J. (2018). “Relação entre a resistência à tração e a tensão de cedência dos aços de varões para armaduras de betão armado. Análise da sua distribuição estatística nas duas últimas décadas”, Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2018, LNEC, 2018, 10 p.