

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



António Manuel Baptista ¹



João Filipe ²

RESUMO

A relação entre a resistência à tração (f_t) e a tensão de cedência (f_y) dos aços dos varões para betão armado constitui uma das características mecânicas que permite avaliar a ductilidade das armaduras utilizadas em elementos estruturais de betão armado. Esta propriedade assume uma importância particularmente relevante quando estes varões são utilizados em estruturas sujeitas a ações sísmicas.

As exigências de ductilidade estabelecidas no Eurocódigo 2 para a relação f_t/f_y dependem da classe de ductilidade dos varões utilizados. De igual modo, as Especificações LNEC aplicáveis a varões de aço para armaduras de betão armado também estabelecem exigências diferentes para esta relação, em função do tipo de varão.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico da informação sobre os valores desta relação f_t/f_y obtidos pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), ao longo das últimas duas décadas, no âmbito do controlo periódico de varões de aço de alta ductilidade e de ductilidade especial decorrente das Ações de Acompanhamento da Certificação destes produtos. Estes valores são calculados a partir dos resultados de ensaios de verificação do produto realizados por cada fabricante dos varões, e de ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC.

Com base nos valores obtidos, estabelecem-se comparações entre as distribuições estatísticas da relação f_t/f_y correspondentes aos resultados obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC, referentes a varões pertencentes a diferentes classes de resistência e de ductilidade, e analisa-se a sua evolução ao longo do tempo, desde o ano de 2000. Para cada tipo de varão, é verificada a conformidade destes resultados com os limites estabelecidos no Eurocódigo 2 e nas Especificações LNEC para esta característica de ductilidade dos aços dos varões para betão armado.

Palavras-chave: Certificação / Varões de aço / Resistência à tração / Tensão de cedência / Análise estatística

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: ambaptista@lnec.pt

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Lisboa, Portugal; e-mail: jfilipe@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

A relação entre a resistência à tração (f_t) e a tensão de cedência (f_y) dos aços dos varões para betão armado constitui uma das características mecânicas que, conjuntamente com a extensão na carga máxima (ϵ_u), permite avaliar a ductilidade das armaduras utilizadas em elementos estruturais de betão armado. Esta propriedade assume uma importância particularmente relevante quando estes varões são utilizados em estruturas sujeitas a ações sísmicas.

A colocação no mercado de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão armado em Portugal depende da sua prévia Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade [1], [2]. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos que, por sua vez, permite validar os valores garantidos pelos Fabricantes com base no seu controlo interno.

O controlo periódico dos varões de aço para estruturas de betão armado utilizados em Portugal, realizado na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação, envolve a análise dos valores da resistência à tração (R_m), da tensão de cedência (R_e) e da relação R_m/R_e destes varões. No caso de o aço não manifestar uma diminuição de força resistente na cedência, a tensão de cedência (R_e) é substituída pela tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($R_{p0,2}$). Os valores destas características do aço 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.

Conforme referido no Eurocódigo 2 [3], o valor característico da tensão de cedência, f_{yk} , dos aços dos varões, 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 da tensão de cedência (R_e), da resistência à tração (R_m) e da relação R_m/R_e são garantidos pelo Fabricante com base no controlo do nível de qualidade a longo prazo da produção dos varões. No entanto considera-se que os métodos de avaliação e verificação utilizados no controlo de qualidade dos varões são suficientes para uma quantificação dos valores característicos referentes a uma dada estrutura, em particular.

Na falta de informação experimental específica sobre a distribuição estatística da relação f_t/f_y , referente às armaduras de aço utilizadas numa dada estrutura, que permita corroborar a hipótese atrás referida, torna-se útil conhecer a distribuição estatística global da relação R_m/R_e , no conjunto dos varões de aço de um dado tipo controlados, num determinado período, em Portugal.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico da informação sobre os valores da relação R_m/R_e obtida pelo LNEC ao longo das duas últimas décadas, no âmbito do referido controlo periódico. Com base nos resultados deste estudo estabelecem-se comparações entre as distribuições estatísticas da relação R_m/R_e correspondentes aos resultados obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC, referentes a varões pertencentes a diferentes classes de resistência e de ductilidade, e analisa-se a sua evolução ao longo do tempo, desde o ano de 2000. Para cada tipo de varão é verificada a conformidade destes resultados com os respetivos limites, estabelecidos no Eurocódigo 2 e nas Especificações LNEC.

2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO ESTATÍSTICO

Os resultados da análise estatística realizada são apresentados nas Figs. 1 a 20. Cada uma destas figuras inclui o conjunto dos resultados obtidos para todos os diâmetros de varões controlados e previstos nas Especificações LNEC E 449:2017 [4], LNEC E 450:2017 [5], LNEC E 455:2017 [6] e LNEC E 460:2017 [7]: 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm e 40 mm.

Os histogramas das Figs. 1 a 4 e das Figs. 7 a 10 apresentam as distribuições estatísticas dos valores da relação R_m/R_e referentes aos aços de varões de alta ductilidade (NR) e de ductilidade especial (NR SD), respetivamente, provenientes dos ensaios realizados pelos fabricantes dos varões e pelo LNEC. Os histogramas das Figs. 5, 6, 11 e 12, apresentam as distribuições estatísticas dos valores da razão $(R_m/R_e)_{Fab} / (R_m/R_e)_{LNEC}$ entre os valores da relação R_m/R_e de cada varão amostrado, determinados pelo Fabricante e pelo LNEC (neste caso, sobre uma segunda amostra do mesmo varão).

O Quadro 1 apresenta uma síntese da informação contida nas Figs. 1 a 12, com a indicação do número total de resultados analisados, obtidos pelos fabricantes dos varões ou pelo LNEC, e dos respetivos valores médios e desvios-padrão, para cada tipo de varão de aço considerado.

As Figs. 13 a 20 mostram as curvas de densidade (*Kernel density estimation*) dos valores da relação R_m/R_e , referentes aos aços das classes de ductilidade NR e NR SD, obtidos pelos fabricantes dos varões e pelo LNEC ao longo de seis triénios sucessivos, entre os anos de 2000 e 2017.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Influência da origem dos resultados

A Fig. 1 mostra um histograma onde consta o número de varões de aço do tipo A400 NR que apresentam valores de R_m/R_e , obtidos em ensaios de tração realizados pelos Fabricantes, compreendidos dentro de cada um dos 44 intervalos nela indicados, entre 1,06 e 1,50. O valor médio dos 4504 resultados apresentados é de 1,235 e o seu desvio-padrão é de 0,0553. A Fig. 3 mostra um histograma idêntico ao da Fig. 1, onde são apresentados os valores da relação R_m/R_e obtidos em ensaios de tração de varões de aço do tipo A400 NR realizados pelo LNEC. O valor médio dos 4532 resultados, igual a 1,230, e o seu desvio-padrão, igual a 0,0557, encontram-se muito próximos dos valores obtidos para o conjunto dos resultados determinados pelos Fabricantes para varões de aço do tipo A400 NR.

Os conjuntos de figuras 1 e 3, 2 e 4, 7 e 9, e 8 e 10, mostram que as médias e os desvios-padrão dos valores da relação R_m/R_e , obtidos em ensaios de tração realizados pelos Fabricantes e pelo LNEC, são semelhantes para cada tipo de varão. Embora existam algumas diferenças entre os dois histogramas na vizinhança dos respetivos valores médios, estas diferenças não influenciam muito os valores característicos correspondentes aos quantilhos de 5% e de 95% das respetivas distribuições estatísticas. As Figs. 5, 6, 11 e 12, apresentam as distribuições estatísticas da razão $(R_m/R_e)_{Fab} / (R_m/R_e)_{LNEC}$ entre os valores da relação R_m/R_e de cada tipo de varão de aço (A400 NR, A500 NR, A400 NR SD ou A500 NR SD), determinados pelo Fabricante e pelo LNEC. É possível constatar que o valor médio \bar{x} destas distribuições é igual ou inferior a 1,011 (ver também o Quadro 1), o que significa que os resultados obtidos pelos Fabricantes são em geral bastante próximos dos resultados correspondentes obtidos pelo LNEC, em cada caso, sobre uma segunda amostra do mesmo varão.

A grande maioria dos valores desta razão está compreendida no intervalo [0,97; 1,05]; atendendo à natural dispersão das características do aço, devida à variação da sua composição química e da sua microestrutura ao longo de um mesmo varão, conclui-se que as incertezas associadas aos métodos de ensaio e aos equipamentos utilizados pelos Fabricantes e pelo LNEC não afetam significativamente os resultados individuais de R_m/R_e referentes a um mesmo varão.

Em resumo, pode-se afirmar que, em termos globais, a origem dos resultados analisados neste estudo, quer eles provenham dos fabricantes dos varões ou do LNEC, não afeta significativamente as distribuições estatísticas dos valores de R_m/R_e referentes a qualquer um dos tipos de varão analisados e, consequentemente, não condiciona as conclusões estabelecidas neste trabalho.

Quadro 1: Quadro recapitulativo do número de resultados analisados (n) e dos respetivos valores médios (\bar{x}) e desvios-padrão (σ)

Tipo de varão	R_m/R_e - Fabricantes			R_m/R_e - LNEC			$(R_m/R_e)_{Fab} / (R_m/R_e)_{LNEC}$		
	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ	n	\bar{x}	σ
A400 NR	4504	1,235	0,0553	4532	1,230	0,0557	4476	1,004	0,0255
A500 NR	7467	1,178	0,0370	7605	1,172	0,0394	7422	1,006	0,0188
A400 NR SD	5140	1,277	0,0296	5179	1,264	0,0377	5139	1,011	0,0247
A500 NR SD	5790	1,207	0,0272	5810	1,195	0,0320	5470	1,010	0,0182

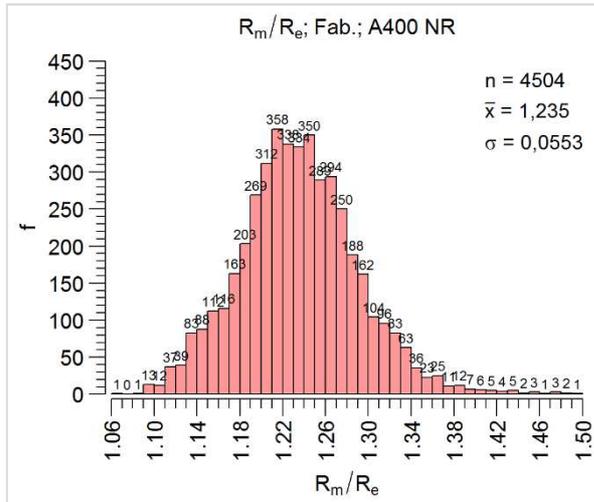


Figura 1. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A400 NR.

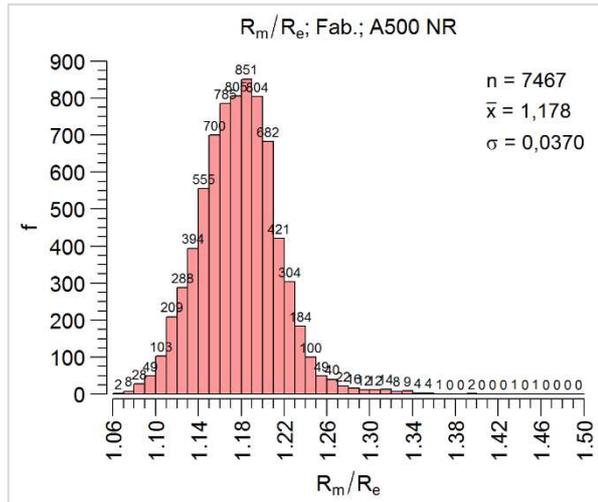


Figura 2. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A500 NR.

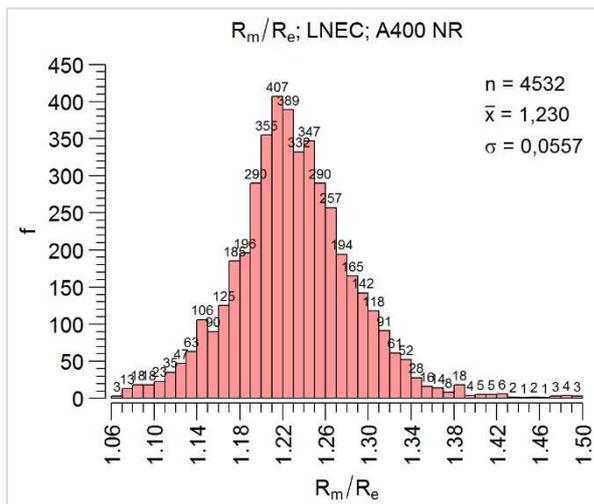


Figura 3. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR.

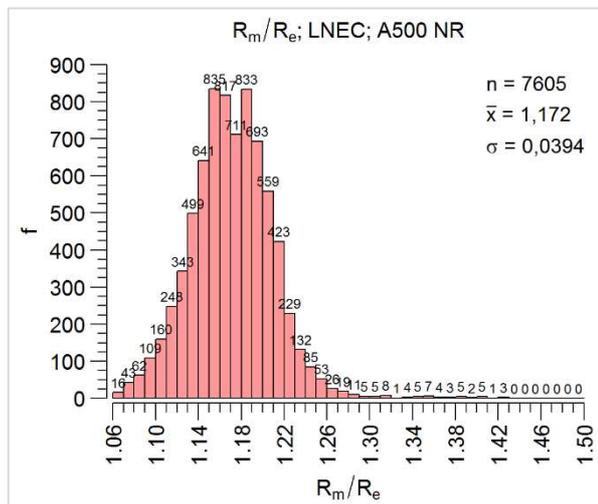


Figura 4. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR.

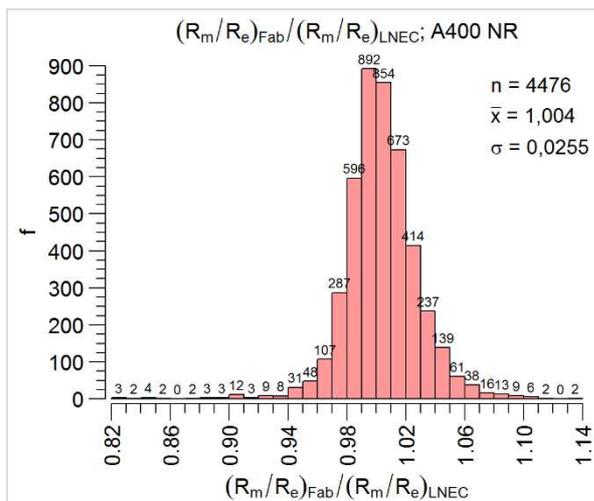


Figura 5. Razão entre os valores de R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR.

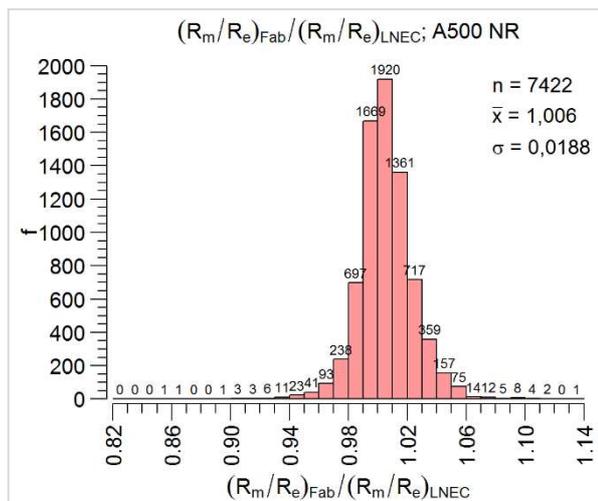


Figura 6. Razão entre os valores de R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR.

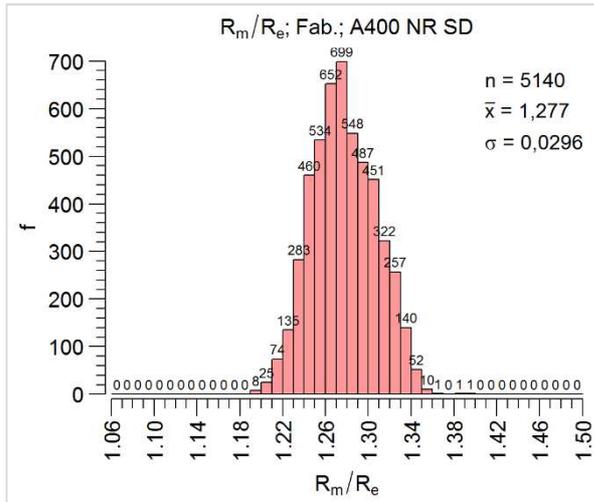


Figura 7. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões do tipo A400 NR SD.

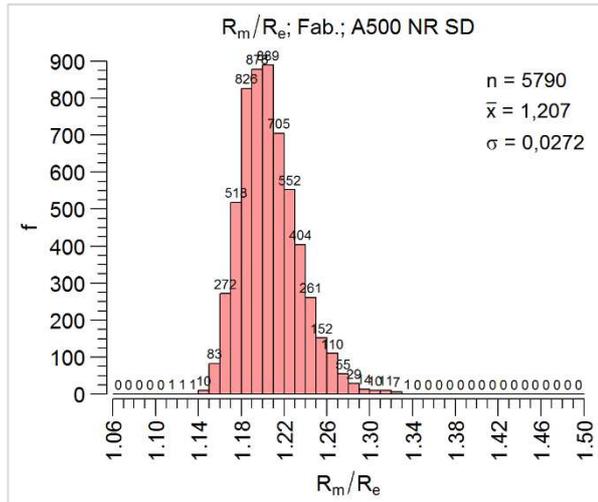


Figura 8. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões do tipo A500 NR SD.

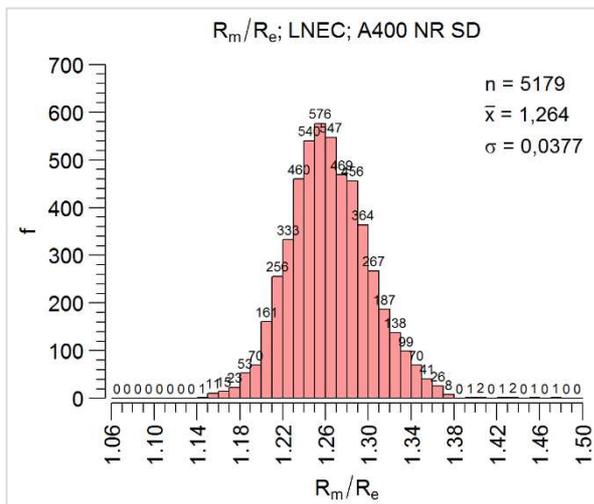


Figura 9. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR SD.

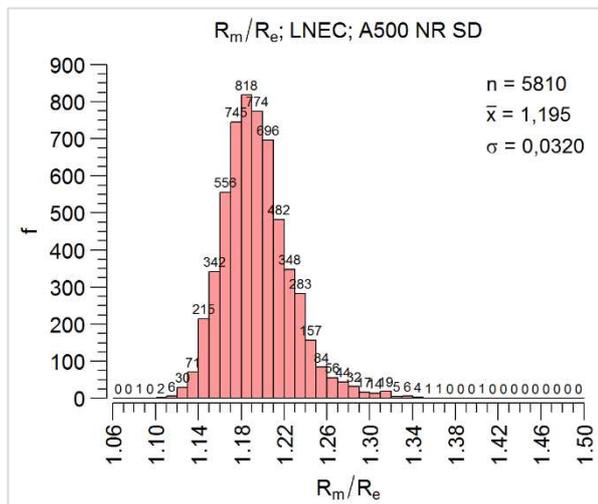


Figura 10. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR SD.

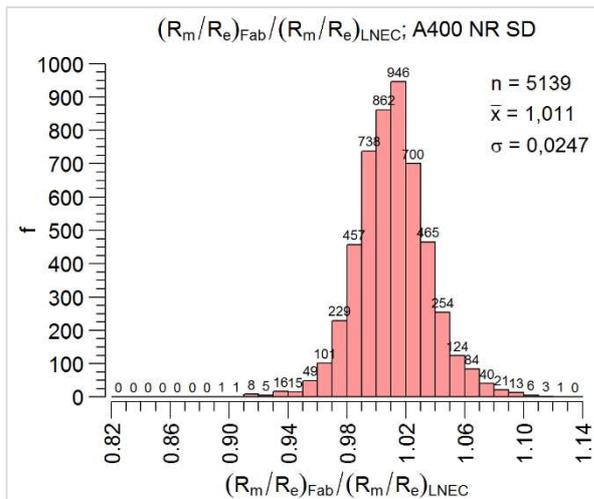


Figura 11. Razão entre os valores de R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR SD.

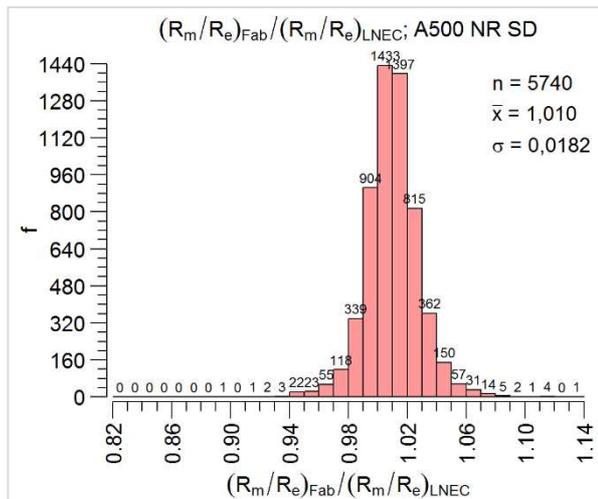


Figura 12. Razão entre os valores de R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR SD.

3.2. Influência da classe de resistência

Através da comparação da Fig. 1 com a Fig. 2 (ou da comparação da Fig. 3 com a Fig. 4) é possível analisar as diferenças principais entre as distribuições dos valores de R_m/R_e referentes a varões de aço da classe de ductilidade NR, das classes de resistência A400 e A500 respetivamente. Constata-se que as médias das distribuições estatísticas dos valores de R_m/R_e , obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC para os varões de aço do tipo A400 NR ($\bar{x}=1,235$ e $\bar{x}=1,230$) são superiores às médias obtidas para os varões de aço do tipo A500 NR ($\bar{x}=1,178$ e $\bar{x}=1,172$). Verifica-se também que a dispersão dos valores de R_m/R_e nos varões de aço do tipo A400 NR ($\sigma=0,0553$ e $\sigma=0,0557$) é sempre superior à dispersão dos valores de R_m/R_e nos varões de aço do tipo A500 NR ($\sigma=0,0370$ e $\sigma=0,0394$).

Através da comparação da Fig. 7 com a Fig. 8 (ou da Fig. 9 com a Fig. 10) é possível analisar as diferenças principais entre as distribuições dos valores de R_m/R_e referentes a varões de aço da classe de ductilidade NR SD, das classes de resistência A400 e A500 respetivamente. Constata-se que, à semelhança dos varões da classe de ductilidade NR, as médias das distribuições estatísticas dos valores de R_m/R_e , obtidos pelos fabricantes dos varões ou pelo LNEC, são mais elevadas no caso dos varões de aço do tipo A400 NR SD ($\bar{x}=1,277$ e $\bar{x}=1,264$) que no caso dos varões do tipo A500 NR SD ($\bar{x}=1,207$ e $\bar{x}=1,195$). A dispersão dos valores de R_m/R_e nos varões de aço do tipo A400 NR SD é ligeiramente superior à dispersão dos valores de R_m/R_e nos varões de aço do tipo A500 NR SD, no caso dos resultados obtidos pelos Fabricantes ($\sigma=0,0296 > \sigma=0,0272$) e no caso dos resultados obtidos pelo LNEC ($\sigma=0,0377 > \sigma=0,0320$).

3.3. Influência da classe de ductilidade

Através da comparação das Figs. 1 a 4 com as Figs. 7 a 9 é possível analisar as diferenças principais entre as distribuições dos valores de R_m/R_e referentes a varões de aço de alta ductilidade NR e as distribuições dos valores de R_m/R_e referentes a varões de aço de ductilidade especial NR SD.

Os valores médios de R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC para os varões de aço do tipo A400 NR ($\bar{x}=1,235$ e $\bar{x}=1,230$) são inferiores aos obtidos para os varões de aço do tipo A400 NR SD ($\bar{x}=1,277$ e $\bar{x}=1,264$). O mesmo se verifica no caso dos varões da classe de resistência A500, uma vez que os valores médios da relação R_m/R_e , obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC para os varões de aço do tipo A500 NR ($\bar{x}=1,178$ e $\bar{x}=1,172$) são inferiores aos obtidos para os varões de aço do tipo A500 NR SD ($\bar{x}=1,207$ e $\bar{x}=1,195$).

Além disso, é possível constatar que a dispersão dos valores de R_m/R_e é sempre maior no caso dos varões de aço de alta ductilidade NR que no caso dos varões de aço de ductilidade especial NR SD pertencentes à mesma classe de resistência. Este facto traduz um controlo da qualidade do produto mais eficaz no caso da produção dos varões NR SD que no caso dos varões NR.

3.4. Valores característicos

Os requisitos aplicáveis aos valores da relação R_m/R_e para os varões de aço dos tipos A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD são indicados nas respetivas Especificações LNEC [4], [5], [6] e [7]. O valor característico referente ao quantilho de 10% da distribuição estatística dos valores de R_m/R_e , determinado com um grau de confiança de 90%, deve ser superior ou igual a 1,08 no caso dos varões de alta ductilidade NR, ou superior ou igual a 1,15 no caso dos varões de ductilidade especial NR SD. O valor característico referente ao quantilho de 90% da referida distribuição estatística, também determinado com um grau de confiança de 90%, deve ser inferior ou igual a 1,35.

Os valores característicos calculados com base nas distribuições de valores da relação R_m/R_e representadas nas Figs. 1 a 4, e nas Figs. 7 a 10, são apresentados no Quadro 2. Através deste quadro é possível constatar que os valores característicos calculados a partir dos resultados obtidos pelos Fabricantes são muito semelhantes aos calculados a partir dos resultados obtidos pelo LNEC. Todos os valores característicos apresentados no Quadro 2 respeitam os respetivos limites mínimo e máximo estabelecidos no Eurocódigo 2 [3] e nas Especificações LNEC aplicáveis a cada caso ([4], [5], [6] ou [7]). Este facto pode igualmente ser constatado através das Figs. 1 a 4 e das Figs. 7 a 10.

Quadro 2: Valores característicos das distribuições de valores da relação R_m/R_e obtidas para varões dos tipos A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD

Tipo de varão	R_m/R_e - Quantilho 10%			R_m/R_e - Quantilho 90%		
	Fabricante	LNEC	Limite mínimo	Fabricante	LNEC	Limite máximo
A400 NR	1,16	1,16	1,08	-	-	-
A500 NR	1,13	1,12	1,08	-	-	-
A400 NR SD	1,24	1,22	1,15	1,31	1,31	1,35
A500 NR SD	1,17	1,15	1,15	1,24	1,24	1,35

3.5. Variação da produção ao longo do tempo

As Figs. 13 a 20 mostram as curvas de densidade (*Kernel density estimation*) dos valores de R_m/R_e , referentes aos quatro tipos de varão analisados (A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD), obtidos pelos fabricantes dos varões e pelo LNEC ao longo de seis triénios sucessivos, compreendidos entre os anos de 2000 e 2017. Cada uma das curvas engloba o conjunto de resultados referentes a todos os diâmetros de varões controlados, atrás referidos.

A análise da evolução das distribuições estatísticas anuais dos valores de R_m/R_e , entre 2000 e 2017, mostra que tanto os valores médios como os valores característicos dos resultados obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC apresentam, por vezes, variações significativas ao longo deste período de tempo.

No caso dos resultados obtidos pelo LNEC, o valor característico referente ao quantilho de 10% da distribuição estatística anual dos valores de R_m/R_e dos varões de aço do tipo A400 NR variou entre 1,20 (em 2010) e 1,11 (em 2017); as variações entre anos consecutivos foram por vezes muito acentuadas (1,12 em 2015, 1,20 em 2016 e 1,11 em 2017, p.ex.). No caso dos varões de aço do tipo A500 NR, este valor característico variou bastante menos, entre 1,14 (em 2005) e 1,11 (em 2017).

No caso dos varões de aço de ductilidade especial as variações entre anos sucessivos foram também menos importantes. O valor característico atrás referido variou entre 1,24 (em 2002) e 1,19 (em 2016) no caso dos varões de aço do tipo A400 NR SD, e entre 1,17 (em 2003) e 1,14 (em 2013) no caso dos varões A500 NR SD. O valor característico referente ao quantilho de 90% da distribuição estatística anual dos valores de R_m/R_e dos varões A400 NR SD variou entre 1,35 (em 2001) e 1,28 (em 2017); no caso dos varões A500 NR SD, este valor característico variou entre 1,25 (em 2003) e 1,21 (em 2014), com um máximo absoluto de 1,27 (em 2010).

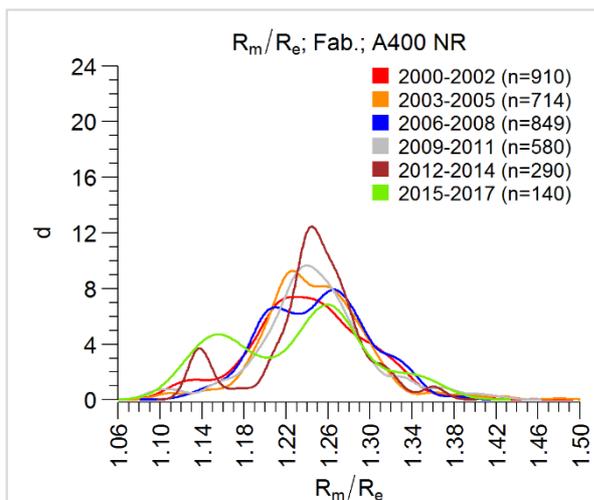


Figura 13. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A400 NR, ao longo dos anos 2000 a 2014.

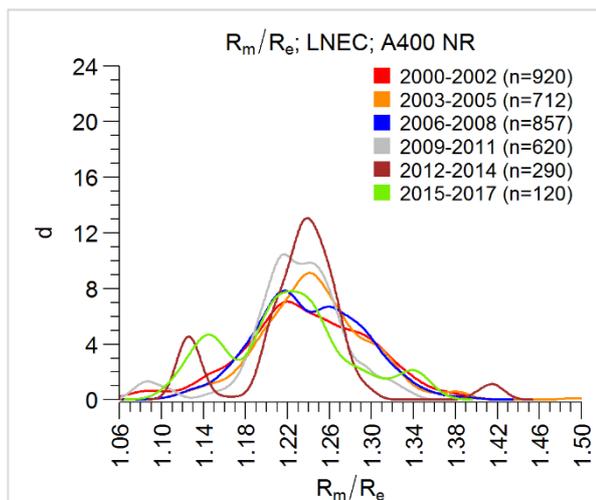


Figura 14. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR, ao longo dos anos 2000 a 2014.

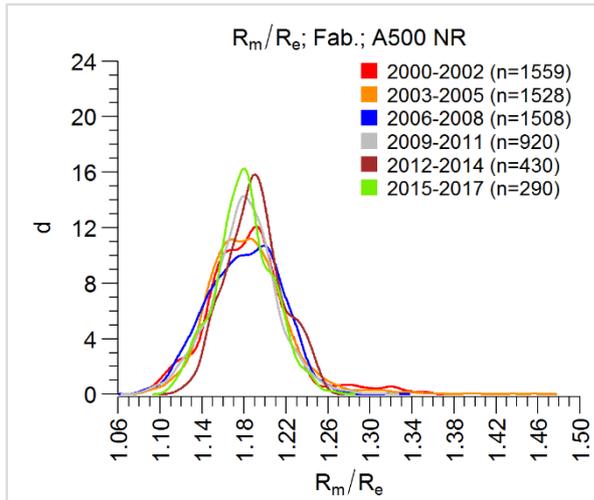


Figura 15. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A500 NR, ao longo dos anos 2000 a 2014.

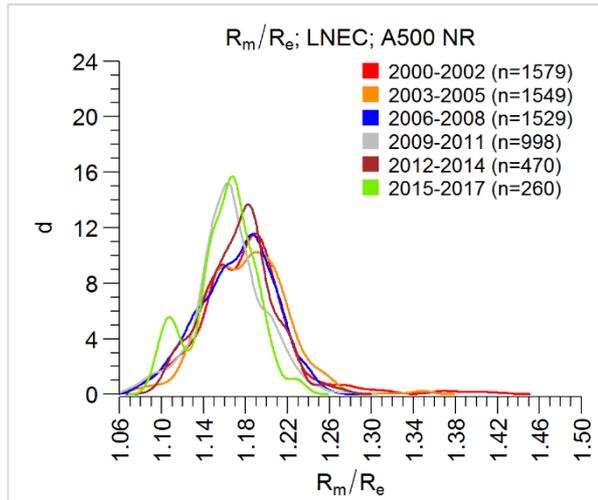


Figura 16. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR, ao longo dos anos 2000 a 2014.

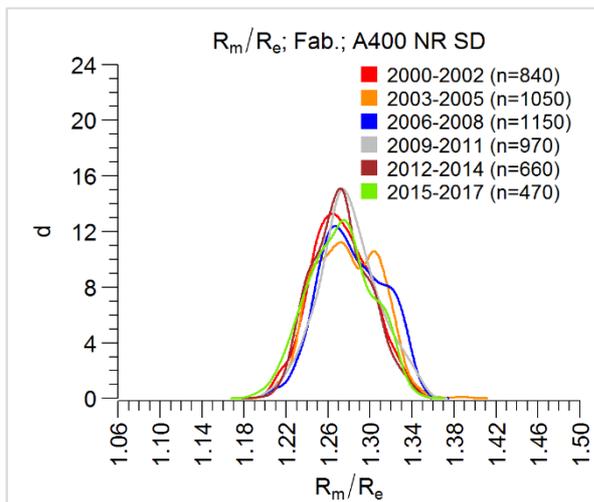


Figura 17. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A400 NR SD, ao longo dos anos 2000 a 2014.

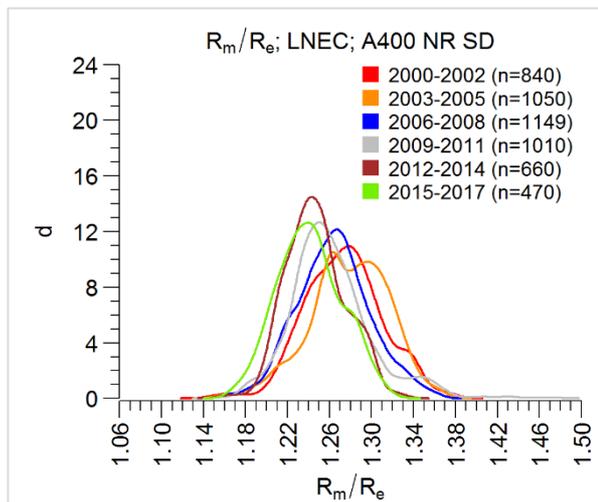


Figura 18. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A400 NR SD, ao longo dos anos 2000 a 2014.

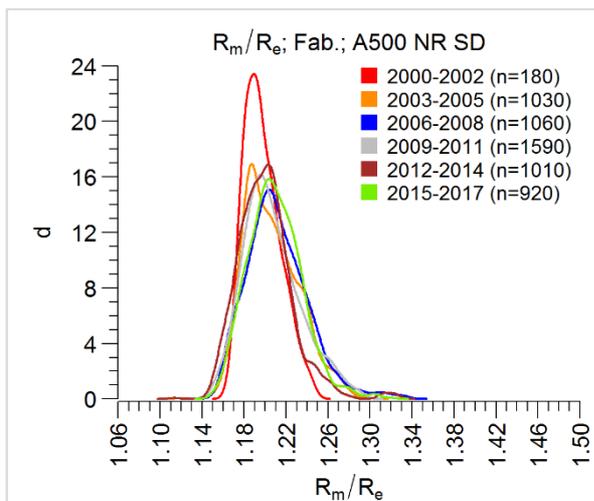


Figura 19. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelos Fabricantes, para varões de aço do tipo A500 NR SD, ao longo dos anos 2000 a 2014.

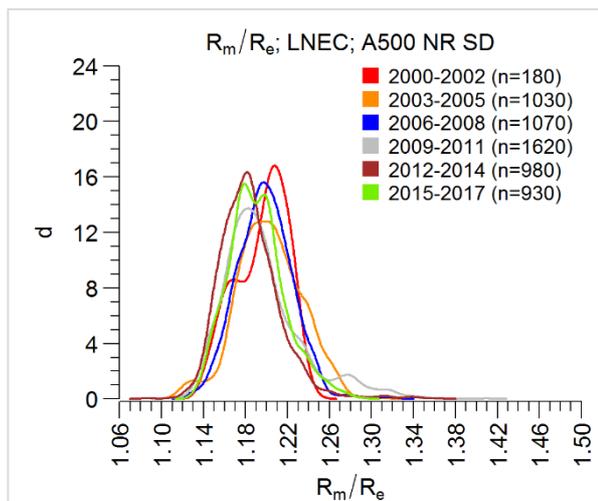


Figura 20. Resultados da relação R_m/R_e obtidos pelo LNEC, para varões de aço do tipo A500 NR SD, ao longo dos anos 2000 a 2014.

3.6. Influência de outros parâmetros

Tal como foi anteriormente referido, cada um dos histogramas das Figs. 1 a 12 inclui o conjunto dos resultados obtidos, entre os anos de 2000 e 2017, para todos os diâmetros de varões controlados: 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 20 mm, 25 mm, 32 mm e 40 mm.

Atendendo à elevada dimensão dos conjuntos de resultados analisados em cada uma dessas figuras, as conclusões que delas se podem retirar serão, em princípio, aplicáveis à generalidade dos varões de aço dos tipos A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD utilizados em armaduras para estruturas de betão armado executadas em Portugal ao longo do período referido.

No entanto, chama-se a atenção para o facto de numa determinada construção, ou até numa parte dela, a distribuição dos valores da relação f_t/f_y , poder diferir significativamente das distribuições da relação R_m/R_e apresentadas no presente artigo. Esta possibilidade resulta do facto de esses valores poderem variar em função da origem dos varões, de um fabricante para outro, ou até mesmo entre varões de um mesmo tipo provenientes de diferentes lotes produzidos pelo mesmo fabricante, devido a variações nos seus processos de produção (ver curva referente ao triénio 2012-2014, nas Figs. 13 e 14).

Acresce ainda que existem outros parâmetros que podem afetar os valores da relação f_t/f_y , como por exemplo o diâmetro do varão; as distribuições destes valores poderão, em certos casos, diferir significativamente de um diâmetro para outro. Destaca-se também a importância da dimensão das amostras analisadas, referentes a cada caso particular (varões com um mesmo diâmetro, produzidos pelo mesmo fabricante, provenientes de um mesmo lote, etc.), que pode condicionar fortemente a estimativa das distribuições estatísticas, baseada nessas amostras.

Porém, a análise detalhada da influência destes parâmetros ultrapassa as limitações do presente artigo, pelo que será abordada noutros trabalhos futuros.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da relação entre a resistência à tração (R_m) e a tensão de cedência (R_e) dos aços de diferentes tipos de varões utilizados em estruturas de betão armado realizadas em Portugal desde o ano de 2000. Os resultados experimentais analisados dizem respeito aos varões dos tipos A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD, que são os mais frequentemente utilizados, e foram recolhidos pelo LNEC no âmbito do controlo periódico destes produtos.

Em geral, pode-se afirmar que a origem dos resultados analisados neste estudo, quer eles provenham de ensaios realizados pelos fabricantes dos varões ou pelo LNEC, não afeta significativamente as distribuições estatísticas dos valores de R_m/R_e referentes a qualquer um dos tipos de varão e, consequentemente, não condiciona as conclusões estabelecidas neste trabalho.

Os valores médios das distribuições estatísticas dos valores da relação R_m/R_e são sempre mais elevados no caso dos varões de aço da classe de resistência A400 que nos da classe de resistência A500, da mesma classe de ductilidade. Por outro lado, os valores da relação R_m/R_e apresentam sempre dispersões maiores no caso dos varões de aço da classe de resistência A400 que no caso dos varões de aço da classe de resistência A500.

O valor médio da relação R_m/R_e é sempre mais elevado no caso dos varões de aço de ductilidade especial (NR SD) que no caso dos varões de aço de alta ductilidade (NR), da mesma classe de resistência. Além disso, a dispersão dos valores da relação R_m/R_e é sempre maior no caso dos varões NR que no caso dos varões NR SD pertencentes à mesma classe de resistência; este facto traduz um controlo da qualidade do produto mais eficaz no caso da produção dos varões NR SD que no caso dos varões NR.

É possível constatar que todos os valores característicos referentes aos quantis 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 , associadas ao conjunto de resultados obtidos para cada um dos tipos de varões atrás referidos, respeitam os respetivos limites mínimo e máximo estabelecidos nas Especificações LNEC aplicáveis a cada um desses produtos ([4], [5], [6] ou [7]).

No conjunto dos 4532 ensaios realizados pelo LNEC sobre varões do tipo A400 NR, apenas 16 conduziram a valores não-conformes da relação R_m/R_e (inferiores ao respetivo limite mínimo estabelecido na Especificação LNEC aplicável); no caso dos varões A500 NR, foram obtidos 59 valores não-conformes num conjunto de 7605 resultados; no caso dos varões A400 NR SD, foi obtido um único valor não-conforme num conjunto de 5179 resultados e, no caso dos varões A500 NR SD, foram obtidos 325 valores não-conformes num conjunto de 5810 resultados. Entretanto, faz-se notar que as exigências aplicáveis aos varões de ductilidade especial (A400 NR SD e A500 NR SD) são mais severas que as aplicáveis aos varões de alta ductilidade (A400 NR e A500 NR). No caso dos resultados dos ensaios realizados pelos fabricantes dos varões de aço, o número de valores não-conformes da relação R_m/R_e é sempre inferior ao atrás indicado, para cada tipo de varão.

Na sua globalidade, estes resultados são muito satisfatórios. No entanto, a análise da evolução das distribuições estatísticas anuais dos valores da relação R_m/R_e , entre 2000 e 2017, mostra que tanto os valores médios como os valores característicos dos resultados obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, para varões de aço de ductilidade especial (A400 NR SD e A500 NR SD), têm vindo a diminuir ao longo do tempo durante a última década. Além disso, o valor médio e o valor característico destas distribuições estatísticas anuais apresentam por vezes variações significativas entre anos consecutivos, sobretudo no caso dos varões de aço do tipo A400 NR.

Salienta-se ainda que é necessário ter em conta que os valores da relação R_m/R_e dos varões de aço para betão armado podem apresentar variações significativas de uma construção para outra, as quais dependem, por exemplo, do diâmetro dos varões, da dimensão das amostras analisadas em cada caso particular e da sua proveniência (do fabricante, dos métodos de fabrico utilizados e do respetivo lote de produção). Interessa, por este motivo, analisar as diferenças entre as distribuições estatísticas dos valores de R_m/R_e obtidas para determinadas condições particulares (para um único diâmetro, por exemplo). Esta análise ultrapassa, porém, as limitações do presente artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] Decreto-Lei nº 128/99, de 21 de abril.
- [2] Decreto-Lei nº 390/2007, de 10 de dezembro.
- [3] NP EN 1992-1-1:2010 “Eurocódigo 2 – Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, 259 p.
- [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 450:2017 “Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017.
- [6] 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.
- [7] Especificação LNEC E 460:2017 “Varões de aço A500 NR de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2017.