

Resistência dos aços de cordões para betão pré-esforçado. Influência da origem dos cordões 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 limite convencional de proporcionalidade a 0,1% e a tensão de rotura dos aços dos cordões utilizados na aplicação de pré-esforço constituem as principais propriedades mecânicas consideradas nos cálculos de verificação da segurança das estruturas de betão pré-esforçado.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico da informação sobre os valores destas propriedades recolhida pelo LNEC no âmbito do controlo periódico da produção de cordões de aço para pré-esforço. Com base nestes resultados foram determinadas as suas distribuições estatísticas globais, referentes ao conjunto dos cordões da classe de resistência 1860 N/mm², mais utilizada em Portugal.

No entanto, estas propriedades podem apresentar variações significativas, que dependem da origem dos cordões e dos métodos de ensaio utilizados na sua determinação, por exemplo. Os cordões 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 de cada uma destas propriedades pode diferir da distribuição global atrás referida.

Também no caso de distribuições referentes a um único fabricante podem ser identificadas diferentes distribuições parcelares, que indiciam a influência adicional de outros parâmetros, tais como o diâmetro dos cordões ou variações da sua produção ao longo do tempo.

Com o objetivo de ilustrar as diferenças entre as distribuições estatísticas destas propriedades, no caso de cordões provenientes de diferentes origens, são também apresentados exemplos de distribuições referentes a cordões produzidos por um único fabricante.

Esta informação fornece uma noção adicional e mais realista sobre a resistência dos cordões de aço da classe de resistência 1860 N/mm² certificados em Portugal ao longo das duas últimas décadas. Poderá, por isso, constituir uma ferramenta útil para a avaliação futura das construções em betão pré-esforçado realizadas em Portugal desde o início do século XXI até à data atual.

Palavras-chave: Betão estrutural; Pré-esforço; Cordões de aço; Tensão limite convencional de proporcionalidade; Tensão de rotura

1 INTRODUÇÃO

A tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% à tração, $f_{p0,1}$, e a tensão de rotura à tração, f_p , do aço dos cordões para pré-esforço constituem as principais propriedades mecânicas consideradas nos cálculos de verificação da segurança das estruturas de betão pré-esforçado. Segundo o Eurocódigo 2 [1], os valores característicos $f_{p0,1k}$ e f_{pk} destas propriedades referem-se às armaduras de pré-esforço utilizadas nessa estrutura em particular, enquanto que os valores característicos da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1k}$, e da tensão de rotura, R_{mk} , dos aços dos cordões para pré-esforço colocados no mercado são garantidos pelo seu Fabricante com base no controlo de qualidade a longo prazo da produção desses cordões.

De acordo com o Decreto-Lei n.º 28/2007 de 12 de fevereiro [2], a colocação no mercado de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão pré-esforçado em Portugal depende da sua prévia Certificação por um organismo acreditado no âmbito do Sistema Português da Qualidade. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação, as quais, por sua vez, permitem validar os valores garantidos pelos fabricantes com base no seu controlo interno.

Na falta de informação experimental específica sobre a distribuição estatística da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% à tração, $f_{p0,1}$, e da tensão de rotura à tração, f_p , referentes aos cordões de aço para pré-esforço utilizados numa dada estrutura, torna-se útil conhecer a distribuição estatística global da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, e da tensão de rotura, R_m , no conjunto dos cordões de aço controlados num determinado período em Portugal.

Com o objetivo de proporcionar esta informação, o presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores de $R_{p0,1}$ e R_m referentes a cordões de aço da classe de resistência 1860 N/mm^2 , formados por seis fios do mesmo diâmetro nominal enrolados helicoidalmente em torno de um fio central reto [3]. Os resultados experimentais analisados foram obtidos pelo LNEC ao longo de mais de duas décadas, no âmbito do controlo periódico deste tipo de produto.

No entanto, importa referir que a experiência deste controlo tem revelado que as tensões $R_{p0,1}$ e R_m destes cordões podem apresentar variações significativas, que dependem da origem dos cordões (do fabricante, dos métodos de fabrico utilizados e do respetivo lote de produção), do diâmetro dos cordões e dos métodos de ensaio utilizados na sua determinação, por exemplo.

Salienta-se que a determinação experimental dos valores de $R_{p0,1}$ e de R_m exige alguns cuidados particulares que envolvem, nomeadamente, o sistema de amarração das extremidades do provete e a medição da extensão no aço dos cordões [4], de modo a evitar incertezas elevadas na sua avaliação.

Os cordões 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 das tensões $R_{p0,1}$ e R_m pode diferir significativamente das respetivas distribuições globais referentes a esse tipo de cordão.

A fim de se avaliar a influência da origem dos cordões, são apresentados exemplos de distribuições de resultados, referentes às tensões $R_{p0,1}$ e R_m , obtidos em ensaios de cordões provenientes de um único fabricante. Estas distribuições são posteriormente comparadas entre si, bem como os respetivos valores característicos, $R_{p0,1k}$ ou R_{mk} .

2 DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados gerais da análise estatística realizada aos valores da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, e 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 destas propriedades ($R_{p0,1}$, R_m), apresentadas nestas figuras.

As Figs. 1 e 3 apresentam histogramas com as distribuições estatísticas globais dos conjuntos de valores das tensões $R_{p0,1}$ e R_m obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, entre os anos de 1998 e de 2019, para todos os diâmetros de cordões, da classe 1860 N/mm², controlados e previstos na Especificação LNEC E 453 [3]. Em cada uma destas figuras são também indicados os valores da média (\bar{x}) e do desvio-padrão (σ) 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 conjuntos de valores das tensões $R_{p0,1}$ e R_m obtidos através dos ensaios de verificação do produto, realizados pelo Fabricante dos cordões, e através dos ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC, no âmbito do controlo periódico dos cordões da classe 1860 N/mm². Em cada uma destas figuras são também apresentados os valores das médias de cada uma destas distribuições estatísticas, $\bar{x}(\text{Fab})$ e $\bar{x}(\text{LNEC})$, e dos respetivos desvios-padrão, $\sigma(\text{Fab})$ e $\sigma(\text{LNEC})$.

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

Propriedade	Fab+LNEC			Fabricantes			LNEC		
	n	\bar{x} (N/mm ²)	σ (N/mm ²)	n	\bar{x} (N/mm ²)	σ (N/mm ²)	n	\bar{x} (N/mm ²)	σ (N/mm ²)
$R_{p0,1}$	2282	1741	52,0	1113	1753	52,2	1169	1730	49,1
R_m	2283	1947	44,8	1113	1947	44,9	1170	1947	44,7

A comparação entre os histogramas das Figs. 1 e 3 mostra que a distribuição estatística da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, apresenta uma dispersão maior ($\sigma=52,0$ N/mm²) que a distribuição da tensão de rotura, R_m ($\sigma=44,8$ N/mm²). Os coeficientes de variação, ρ , destas distribuições estatísticas são $\rho=2,98\%$ e $\rho=2,30\%$, respetivamente.

A comparação entre os histogramas da Fig. 4 mostra que a distribuição estatística dos valores da tensão R_m obtidos pelos Fabricantes é muito semelhante à distribuição dos resultados de R_m obtidos pelo LNEC. Porém, o mesmo não acontece no caso das distribuições estatísticas dos valores da tensão $R_{p0,1}$ (Fig. 2); neste caso, os resultados obtidos pelos Fabricantes apresentam valores mais elevados e uma maior dispersão que os resultados obtidos pelo LNEC.

As diferenças entre estas distribuições estatísticas (Fig. 2), bem como a maior dispersão dos resultados referentes à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$ (Tabela 1), são atribuídas à maior incerteza associada à determinação do módulo de elasticidade dos cordões e, consequentemente, ao cálculo do valor da sua tensão $R_{p0,1}$, relativamente à incerteza associada à determinação da sua tensão de rotura, R_m . Ainda assim, a Tabela 1 mostra que, no seu conjunto, os resultados obtidos através dos ensaios de verificação (Fabricantes) são coerentes com os resultados obtidos nos ensaios de acompanhamento (LNEC).

Os valores característicos $R_{p0,1.k5\%}$ e $R_{m.k5\%}$, referentes aos quantilhos de 5% da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1% e da tensão de rotura, calculados com um grau de confiança de 95% [3] a partir das distribuições estatísticas globais apresentadas nas Figs. 1 a 4, são indicados na Tabela 2.

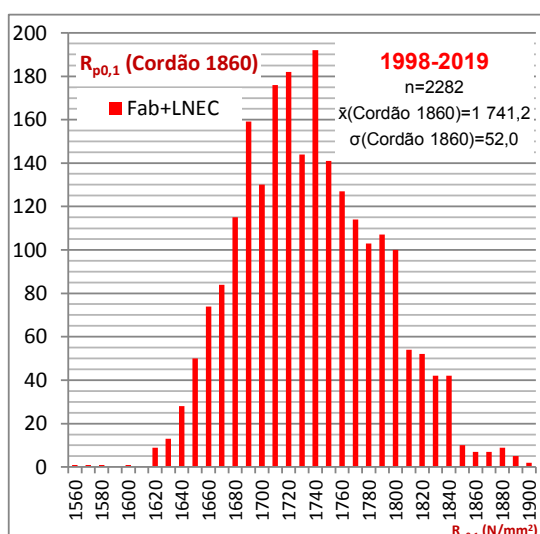


Figura 1. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm^2), obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

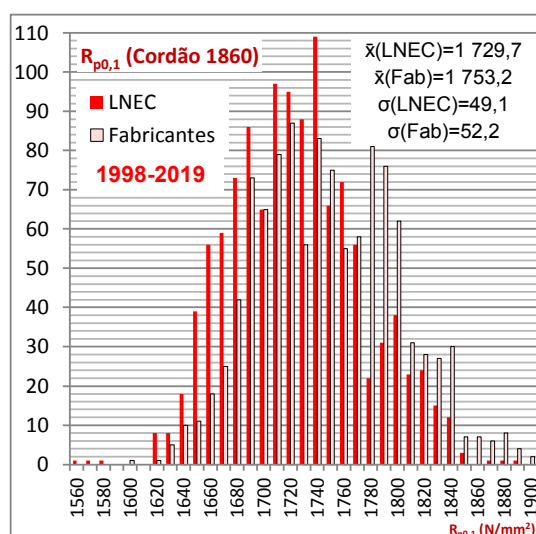


Figura 2. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm^2), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC

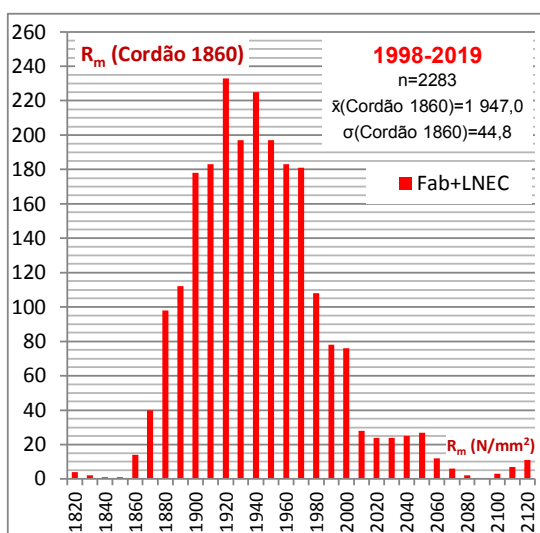


Figura 3. Resultados da tensão R_m (N/mm^2), obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

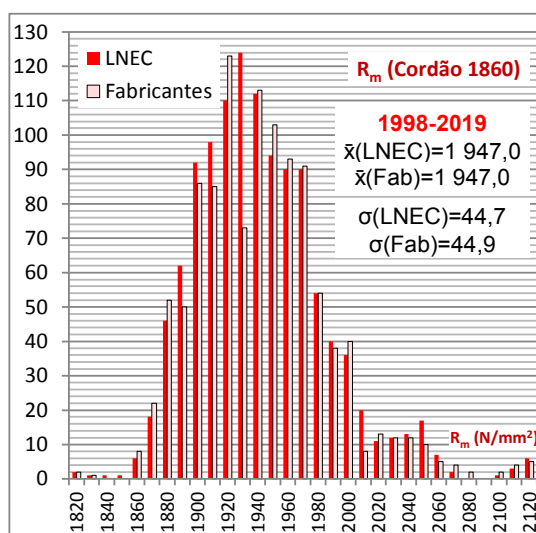


Figura 4. Resultados da tensão R_m (N/mm^2), obtidos pelos Fabricantes ou pelo LNEC

Tabela 2: Valores característicos, $R_{p0,1,k5\%}$ e $R_{m,k5\%}$, das distribuições estatísticas da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, e da tensão de rotura, R_m .

	Fab+LNEC	Fabricantes	LNEC
$R_{p0,1,k5\%}$ (N/mm^2)	1653	1663	1645
$R_{m,k5\%}$ (N/mm^2)	1871	1870	1870

A Especificação LNEC E 453 [3] não estabelece explicitamente limites mínimos para as tensões $R_{p0,1}$ e R_m . Os limites mínimos aí indicados referem-se aos valores característicos da força limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $F_{p0,1,k5\%}$, e da força de rotura, $F_{m,k5\%}$, os quais dependem do diâmetro nominal do cordão, S_n , é possível determinar os limites mínimos de $1640 N/mm^2$ e de $1860 N/mm^2$, aplicáveis aos valores característicos $R_{p0,1,k5\%}$ e $R_{m,k5\%}$ respetivamente.

É possível constatar que os valores característicos $R_{m.k5\%}$ da tensão de rotura, indicados na Tabela 2, são idênticos entre si e satisfazem o respetivo limite mínimo de 1860 N/mm².

O valor característico $R_{p0,1.k5\%}$ dos resultados obtidos pelos Fabricantes é superior ao dos resultados obtidos pelo LNEC; no entanto, a diferença relativa de 1,1% entre estes valores característicos é suficientemente pequena para se poder considerar que a origem dos resultados não afeta significativamente a sua apreciação. De qualquer modo, é possível verificar que todos os valores característicos $R_{p0,1.k5\%}$ indicados na Tabela 2 satisfazem o respetivo limite mínimo de 1640 N/mm².

3 INFLUÊNCIA DA ORIGEM DOS CORDÕES

No presente estudo foi decidido efetuar uma análise das tensões $R_{p0,1}$ e R_m , em vez dos respetivos valores das forças, $F_{p0,1}$ e F_m , determinados experimentalmente no âmbito do controlo periódico do fabrico dos cordões, pelo facto de os valores das tensões, sendo independentes da área nominal da secção transversal dos cordões, S_n , permitirem a realização de uma análise global para o conjunto de todos os diâmetros de cordões de uma mesma classe de resistência (classe 1860 N/mm², no presente caso).

Sendo assim, os resultados apresentados na secção anterior incluem todos os diâmetros de cordões produzidos por todos os Fabricantes controlados entre 1998 e 2019. Conforme foi referido, estes resultados satisfazem, no seu conjunto, os requisitos aplicáveis às tensões $R_{p0,1}$ e R_m [3].

Entretanto, foi já referido que as tensões $R_{p0,1}$ e R_m podem 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 cordões da mesma classe provenientes do mesmo fabricante, ii) a cordões da mesma classe com o mesmo diâmetro nominal, ou iii) a cordões da mesma classe controlados no mesmo ano, por exemplo. A fim de se observar a influência da origem dos cordões, as Figs. 5 e 7 apresentam exemplos de distribuições de valores da tensão $R_{p0,1}$ correspondentes a cordões da classe 1860 N/mm² produzidos por diferentes fabricantes

A Fig. 5, por exemplo, mostra que as distribuições de resultados da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, correspondentes aos cordões produzidos pelos Fabricantes F041 e F043 são distintas uma da outra, e diferentes da distribuição global apresentada na Fig. 1. O valor médio dos valores de $R_{p0,1}$ referentes ao F041 é inferior ao da distribuição referente ao F043; no entanto, a dispersão dos resultados referentes ao F043 é muito superior. Por este motivo, o valor característico $R_{p0,1.k5\%}$ dos resultados referentes ao F041 ($R_{p0,1.k5\%}=1651$ N/mm²) é superior ao dos resultados referentes ao F043 ($R_{p0,1.k5\%}=1631$ N/mm²); este último não satisfaz o correspondente limite de 1640 N/mm² [3], apesar de grande parte dos valores desta distribuição serem relativamente elevados.

Entretanto, é possível constatar que a distribuição de resultados referentes ao Fabricante F043 (Fig. 5) engloba várias distribuições parcelares que indiciam a influência particular de outros parâmetros, tais como os já anteriormente referidos (diâmetro dos cordões, e variações da produção ao longo do tempo). O valor médio de algumas destas distribuições parcelares será bastante superior ao da distribuição global apresentada na Fig. 5, e a sua dispersão será menor, pelo que os respetivos valores característicos $R_{p0,1.k5\%}$ serão mais elevados, respeitando em geral o respetivo limite de 1640 N/mm² [3].

Também no caso do Fabricante F041 (Fig. 5) é possível identificar a existência de várias distribuições parcelares, embora estas sejam menos distintas que no caso do Fabricante F043 (Fig. 5).

Faz-se notar que o valor médio dos resultados referentes ao F043 é idêntico ao da distribuição global (Fig. 1); no entanto, o valor característico $R_{p0,1,k5\%}=1653 \text{ N/mm}^2$ desta última é idêntico ao dos resultados referentes ao F041. Este facto resulta das diferentes dispersões destas distribuições (Fig. 5).

A Fig. 6 mostra as distribuições de resultados da tensão de rotura, R_m , correspondentes aos cordões produzidos pelos Fabricantes F041 e F043. Também neste caso, o valor médio dos valores do F041 é inferior ao da distribuição referente ao F043, enquanto que a dispersão dos primeiros (F041) é bastante menor. Consequentemente, os respetivos valores característicos $R_{m,k5\%}=1874 \text{ N/mm}^2$ (F041) e $R_{m,k5\%}=1868 \text{ N/mm}^2$ (F043) são próximos do valor característico $R_{m,k5\%}=1871 \text{ N/mm}^2$ da distribuição global (Tabela 2). Faz-se notar que todos estes valores característicos respeitam o respetivo limite mínimo de 1860 N/mm^2 [3].

Na Fig. 6 é também possível constatar, sobretudo no caso do Fabricante F043, que as distribuições globais de resultados da tensão de rotura, R_m , aglomeram várias distribuições parcelares, tal como foi observado anteriormente no caso das distribuições de valores da tensão $R_{p0,1}$ (Fig. 5).

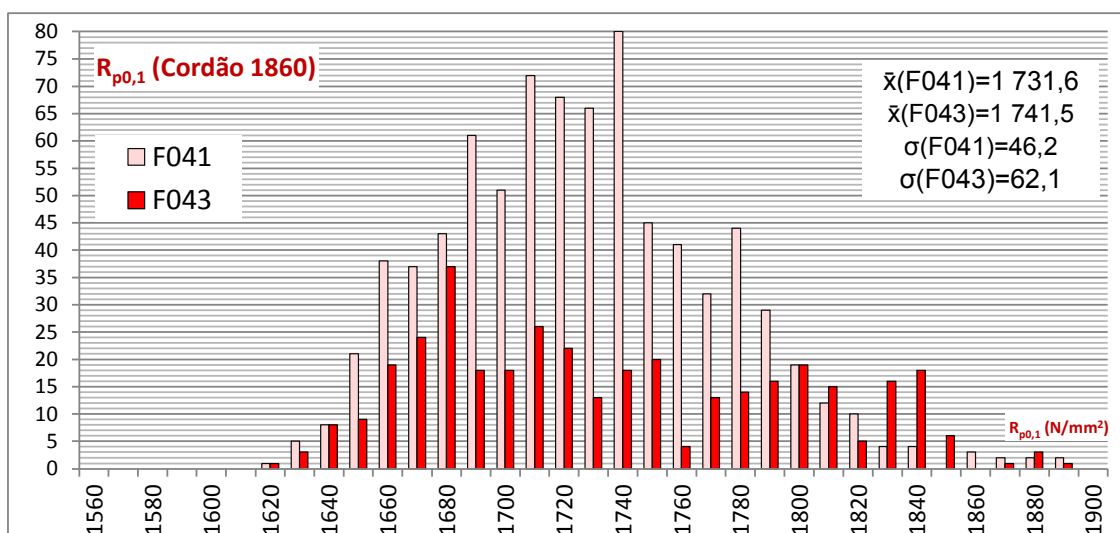


Figura 5. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm^2), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe 1860 N/mm^2 provenientes de um único Fabricante (F041 ou F043)

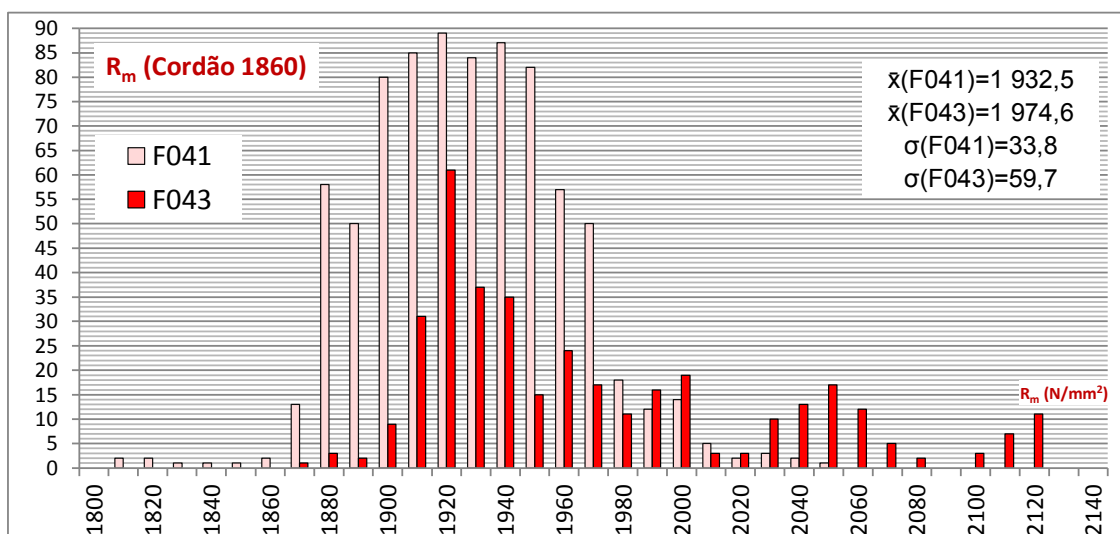


Figura 6. Resultados da tensão R_m (N/mm^2), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe 1860 N/mm^2 provenientes de um único Fabricante (F041 ou F043)

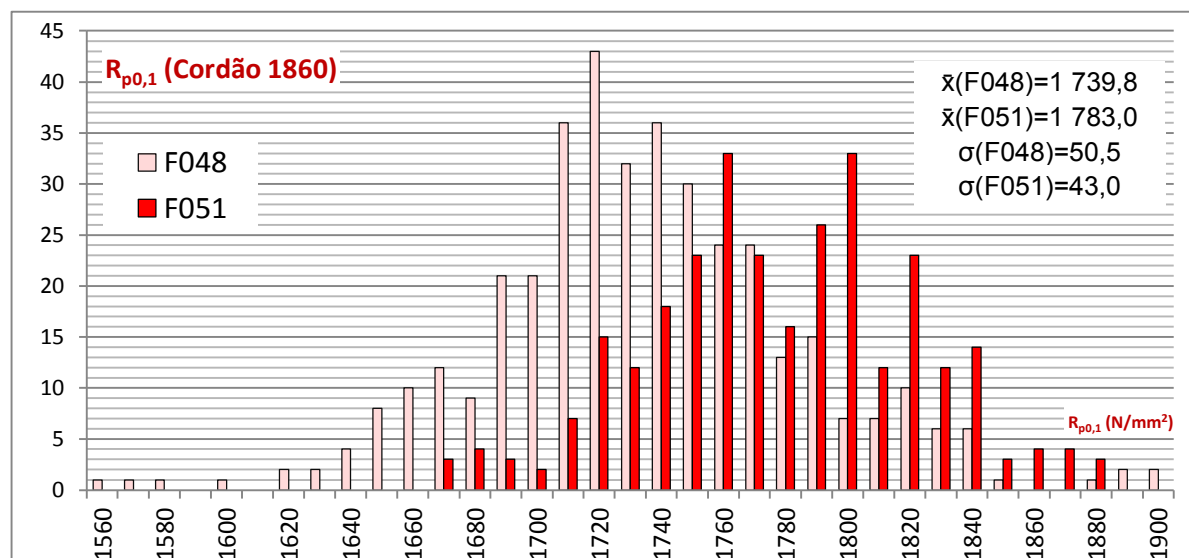


Figura 7. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm^2), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe 1860 N/mm^2 provenientes de um único Fabricante (F048 ou F051)

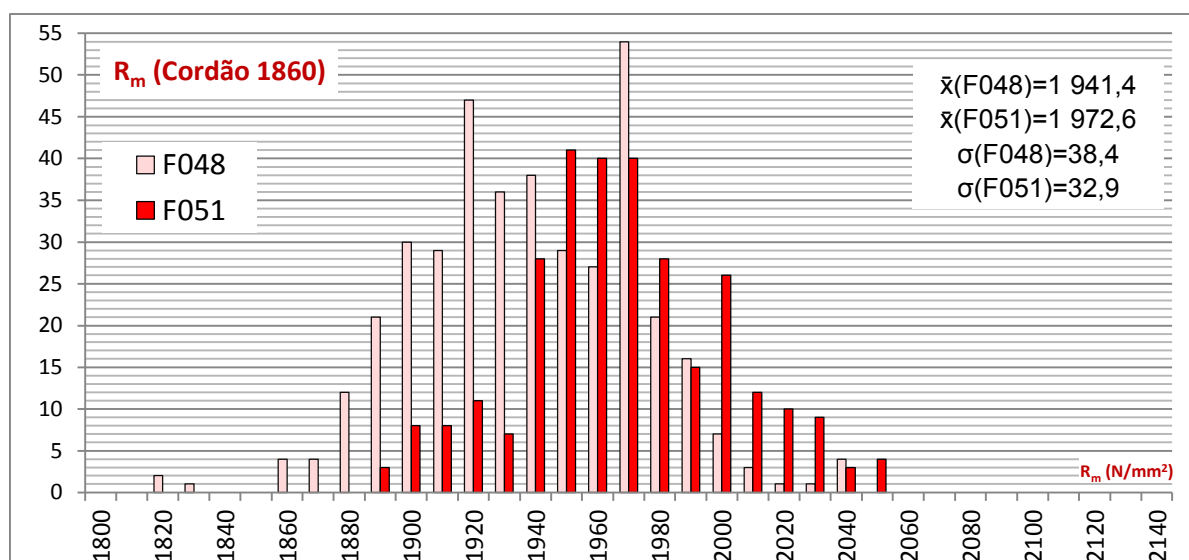


Figura 8. Resultados da tensão R_m (N/mm^2), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe 1860 N/mm^2 provenientes de um único Fabricante (F048 ou F051)

A Fig. 7 mostra uma comparação entre duas distribuições de resultados da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, correspondentes aos cordões produzidos pelos Fabricantes F048 e F051, com diferenças relativas entre si diferentes das observadas na Fig. 5. Na Fig. 7 a diferença entre os desvios-padrão das duas distribuições é menor que na Fig. 5. A forma da distribuição de resultados referente ao F041 (Fig. 5) é semelhante à das distribuições referentes aos F048 e F051 (Fig. 7), enquanto que a distribuição referente ao F043 (Fig. 5) é muito diferente das restantes.

A distribuição referente ao F051 (Fig. 7) apresenta um desvio relativo em relação às distribuições dos F041 (Fig. 5) e F048 (Fig. 7), que se traduz num valor médio mais elevado ($1783 N/mm^2$). Por este motivo, o valor característico $R_{p0,1.k5\%}$ dos resultados referentes ao F051 ($R_{p0,1.k5\%}=1705 N/mm^2$) é muito superior ao dos resultados referentes ao F048 ($R_{p0,1.k5\%}=1650 N/mm^2$), ao F041 ($R_{p0,1.k5\%}=1651 N/mm^2$) e ao F043 ($R_{p0,1.k5\%}=1631 N/mm^2$).

Os valores característicos $R_{p0,1,k5\%}$ dos resultados referentes ao F041 e ao F048 são idênticos e semelhantes ao valor característico $R_{p0,1,k5\%}$ da distribuição global de resultados de $R_{p0,1}$ ($R_{p0,1,k5\%}=1653$ N/mm²) obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC, indicado na Tabela 2.

É possível constatar que as distribuições de resultados referentes aos Fabricantes F048 e F051 (Fig. 7) também englobam várias distribuições parcelares que indiciam a influência particular de outros parâmetros (diâmetro dos cordões, por exemplo), embora essa influência não seja tão marcada como no caso da distribuição referente ao F043 (Fig. 5).

A Fig. 8 mostra as distribuições de resultados da tensão de rotura, R_m , correspondentes aos cordões produzidos pelos Fabricantes F048 e F051. Também neste caso, o valor médio dos valores do F048 é inferior ao da distribuição referente ao F051, enquanto que a dispersão dos primeiros (F048) é um pouco maior. Por isso, o valor característico da distribuição referente ao F051 ($R_{m,k5\%}=1913$ N/mm²) é mais elevado que no caso do F048 ($R_{m,k5\%}=1873$ N/mm²); este último é próximo do valor característico $R_{m,k5\%}=1871$ N/mm² da distribuição global de resultados de R_m (Tabela 2) obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC. Mais uma vez, todos estes valores característicos respeitam o respetivo limite mínimo de 1860 N/mm² [3].

Na Fig. 8 também é possível observar que cada uma das distribuições referentes a um dado Fabricante engloba várias distribuições parcelares, embora este facto não seja tão marcante como no caso das distribuições de valores da tensão $R_{p0,1}$ (Fig. 7).

Outro aspeto interessante é o da comparação entre as distribuições de resultados da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1, $R_{p0,1}$, e da tensão de rotura, R_m , referentes a um mesmo fabricante. A fim de facilitar esta comparação, as Figs. 9 e 10 apresentam estas duas distribuições referentes aos fabricantes F041 e F048, anteriormente analisadas. Antes de mais, é possível confirmar que a dispersão dos valores da tensão $R_{p0,1}$ é sempre superior à dos valores da tensão R_m , conforme se havia constatado anteriormente, aquando da análise das distribuições globais destas propriedades mecânicas (Tabela 1).

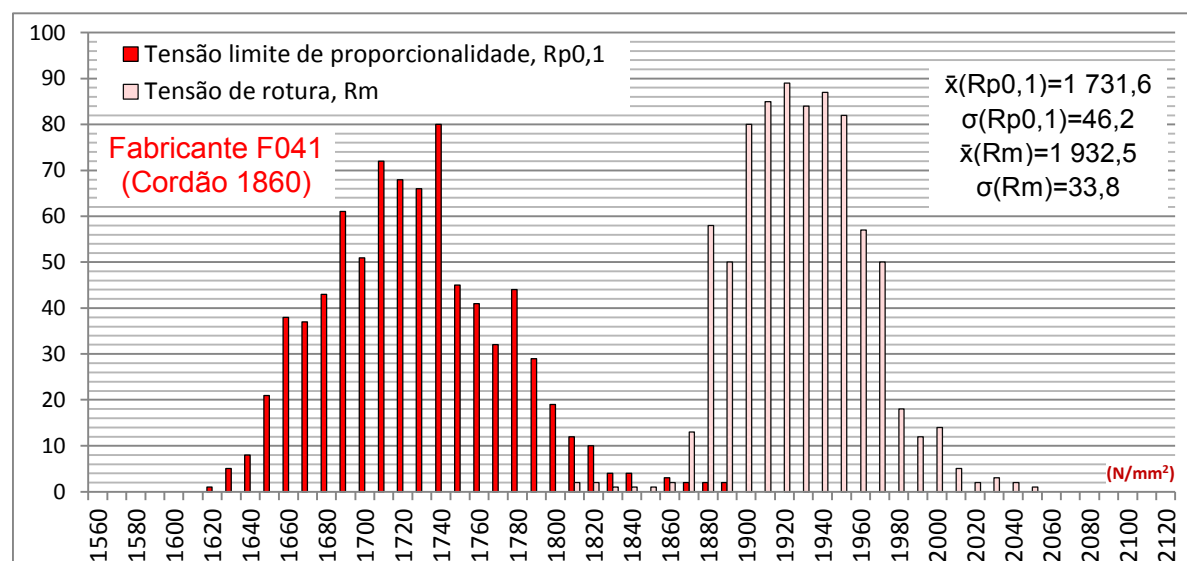


Figura 9. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm²) e da tensão R_m (N/mm²), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe 1860 N/mm² provenientes do Fabricante F041

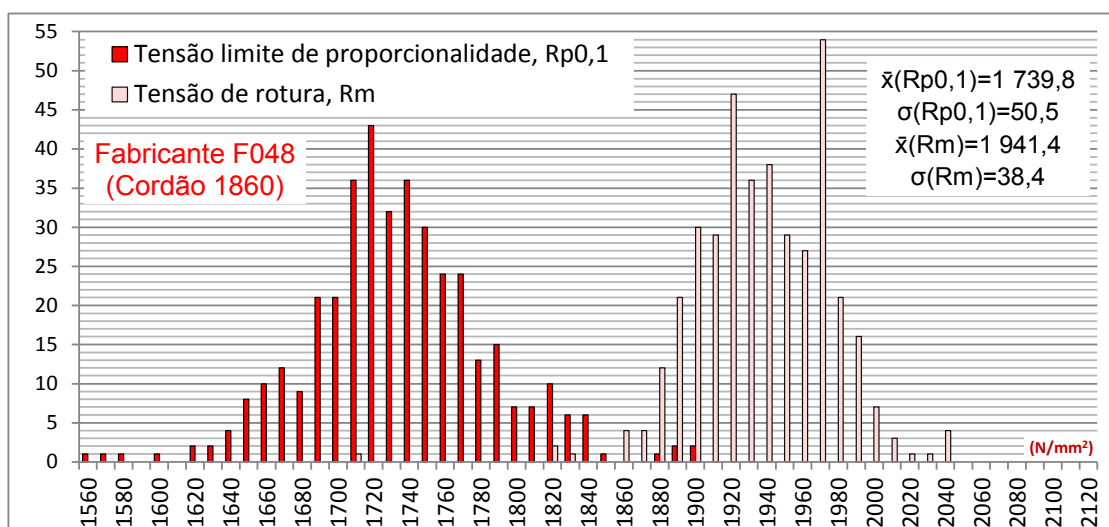


Figura 10. Resultados da tensão $R_{p0,1}$ (N/mm^2) e da tensão R_m (N/mm^2), obtidos pelo Fabricante e pelo LNEC para cordões de aço da classe $1860 \text{ N}/\text{mm}^2$ provenientes do Fabricante F048

Verifica-se ainda que a diferença entre o valor médio da tensão R_m e o valor médio da tensão $R_{p0,1}$ é muito semelhante para cada um dos fabricantes (o mesmo acontece com os restantes fabricantes que não estão representados nas Figs. 5 a 10). Excetua-se o caso do Fabricante F043, no qual foi obtida uma diferença 15% superior à verificada nos restantes casos; no entanto, como foi já mencionado, as distribuições de resultados referentes ao F043 apresentam uma forma diferente das distribuições referentes aos outros fabricantes.

As Figs. 9 e 10 mostram também que os valores mínimo e máximo das tensões $R_{p0,1}$ e R_m podem apresentar diferenças muito elevadas, para um mesmo fabricante, as quais atingem cerca de $330 \text{ N}/\text{mm}^2$ no caso do Fabricante F048. Tanto neste caso como no do Fabricante F041 é possível observar a ocorrência de valores da tensão R_m inferiores a valores da tensão $R_{p0,1}$ obtidos no ensaio de outros cordões do mesmo fabricante.

4 CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, e da tensão de rotura, R_m , referentes a cordões de aço da classe de resistência $1860 \text{ N}/\text{mm}^2$, formados por seis fios do mesmo diâmetro nominal enrolados helicoidalmente em torno de um fio central reto [3]. Os resultados experimentais analisados foram obtidos pelo LNEC ao longo de mais de duas décadas, no âmbito do controlo periódico deste tipo de produto.

Atendendo ao elevado número de resultados analisados (Tabela 1), as conclusões obtidas neste estudo serão, em princípio, aplicáveis à generalidade destes cordões de aço utilizados em armaduras de estruturas de betão pré-esforçado realizadas em Portugal desde o ano de 1998.

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 cordões ou de ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC, não afeta significativamente as distribuições estatísticas dos valores de $R_{p0,1}$ e R_m e, conseqüentemente, não condiciona as conclusões estabelecidas neste trabalho. No caso da tensão R_m os valores obtidos são idênticos e no caso da tensão $R_{p0,1}$ as diferenças relativas entre os valores médios e entre os valores característicos dos resultados obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC são pouco superiores a 1%. (Tabela 1 e Tabela 2).

As distribuições da tensão $R_{p0,1}$ apresentam dispersões superiores às da tensão R_m . Este facto é atribuído à maior incerteza associada à determinação do módulo de elasticidade dos cordões e, consequentemente, ao cálculo da tensão $R_{p0,1}$, relativamente à incerteza do valor da tensão de rotura.

Os valores característicos $R_{p0,1,k5\%}$ e $R_{m,k5\%}$, referentes aos quantilhos de 5% destas propriedades, calculados com um grau de confiança de 95% a partir das suas distribuições globais, respeitam os limites mínimos de 1640 N/mm^2 e de 1860 N/mm^2 , calculados com base nos requisitos estabelecidos na Especificação LNEC E 453 [3] aplicável aos cordões de aço para pré-esforço.

No entanto, constata-se que as distribuições estatísticas das tensões $R_{p0,1}$ e R_m podem variar de um fabricante para outro e que, nalguns casos, 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 podem ser identificadas diferentes distribuições parcelares, que indiciam a influência adicional de outros parâmetros, tais como o diâmetro dos cordões ou variações da produção ao longo do tempo.

Os cordões 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 limite convencional de proporcionalidade a 0,1%, $R_{p0,1}$, e da tensão de rotura, R_m , podem 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 destas propriedades mecânicas, 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 dos valores das tensões $R_{p0,1}$ e R_m de cordões provenientes de diferentes origens são apresentados exemplos de distribuições referentes a cordões produzidos por um único fabricante. Esta informação fornece uma noção adicional e mais realista sobre a resistência dos cordões de aço da classe de resistência 1860 N/mm^2 certificados em Portugal durante as duas últimas décadas. Poderá, por isso, constituir uma ferramenta útil para a avaliação futura das construções em betão pré-esforçado 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 n.º 28/2007 de 12 de fevereiro.
- [3] Especificação LNEC E 453:2020 “Cordões de aço para pré-esforço. Características e ensaios”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2020.
- [4] Baptista, A.M. (1990) “Ensaio de cordões de aço para pré-esforço. Novas técnicas desenvolvidas no LNEC”, 2º Encontro Nacional sobre Análise Experimental de Tensões, LNEC, p. 4.57-4.68.