

Tensão de rotura dos aços de cordões para betão pré-esforçado. Análise da sua distribuição estatística nas duas últimas décadas



**António Manuel
Baptista ¹**



João Filipe ²

Resumo

A tensão de rotura à tração dos aços dos cordões utilizados na aplicação de pré-esforço (f_p) constitui uma das principais características mecânicas consideradas nos cálculos de verificação da segurança das estruturas de betão pré-esforçado.

Esta característica pode apresentar variações significativas, que dependem da composição química do aço, da proveniência 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.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão de rotura à tração de cordões de aço da classe de resistência 1860, formados por seis fios do mesmo diâmetro nominal enrolados helicoidalmente em torno de um fio central reto. Os resultados experimentais analisados foram recolhidos pelo LNEC ao longo das duas últimas décadas, no âmbito do controlo periódico deste tipo de produto.

Com base nos resultados obtidos estabelecem-se comparações entre as distribuições estatísticas desta característica mecânica, referentes a cordões de aço com seis diâmetros nominais diferentes e com diversas proveniências, bem como entre as suas evoluções ao longo do tempo.

Palavras-chave: Betão pré-esforçado / Cordões de aço / Tensão de rotura à tração / Análise estatística

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

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

1. INTRODUÇÃO

A tensão de rotura à tração dos aços dos cordões utilizados na aplicação de pré-esforço (f_p) constitui uma das principais características mecânicas consideradas nos cálculos de verificação da segurança das estruturas de betão pré-esforçado. Este parâmetro é utilizado, por exemplo, no cálculo da tensão máxima aplicável ao cordão de pré-esforço, na avaliação das características de ductilidade dos cordões (através da sua relação com a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,1 %) ou na estimativa das perdas de pré-esforço devidas à relaxação do aço dos cordões [1].

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 que, por sua vez, permite validar os valores garantidos pelos fabricantes com base no seu controlo interno.

O controlo periódico dos cordões de aço para pré-esforço utilizados em Portugal, realizado na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação, envolve a análise dos valores da tensão de rotura à tração destes cordões. Estes valores são obtidos no âmbito dos ensaios de verificação do produto realizados pelo fabricante dos cordões, e dos ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC.

A experiência deste controlo tem revelado que esta característica pode apresentar variações significativas, que dependem da proveniência 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.

A determinação experimental da tensão de rotura à tração dos cordões de aço para pré-esforço (a seguir designada através do símbolo R_m , de acordo com a Especificação LNEC E 453 [2]) exige alguns cuidados particulares que envolvem, essencialmente, o sistema de amarração das extremidades do provete [3]. Acrescem ainda, como fatores de dispersão dos resultados, as incertezas associadas à determinação da força de ensaio e a dimensão das amostras controladas.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão de rotura à tração de cordões de aço da classe de resistência 1860, formados por seis fios do mesmo diâmetro nominal enrolados helicoidalmente em torno de um fio central reto [2]. Os resultados experimentais analisados foram recolhidos pelo LNEC ao longo das duas últimas décadas, no âmbito do controlo periódico deste tipo de produto.

2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO ESTUDO ESTATÍSTICO

Os resultados da análise estatística realizada são apresentados nas Figuras 1 a 24.

Os histogramas das Figuras 1 a 6 permitem analisar a influência do diâmetro dos cordões no valor da sua da tensão de rotura à tração (R_m), num conjunto de seis diâmetros diferentes (9,3 mm, 12,5 mm, 13,0 mm, 15,2 mm, 15,3 mm, e 15,7 mm). As Figuras 7 a 12 mostram as curvas de densidade (Kernel density estimation) destes valores de R_m , para cada um dos seis diâmetros considerados nas Figuras 1 a 6, ao longo de oito biénios sucessivos compreendidos entre os anos de 2000 e 2015.

As Figuras 13 a 18 mostram histogramas com as distribuições dos valores de R_m em conjuntos de cordões com os seis diâmetros considerados nas Figuras 1 a 12, produzidos por cada um de seis fabricantes diferentes. As Figuras 19 a 24 são idênticas às Figuras 7 a 12, e referem-se às curvas de densidade dos valores de R_m , para cada um dos seis fabricantes considerados nas Figuras 13 a 18, ao longo dos oito biénios sucessivos atrás referidos.

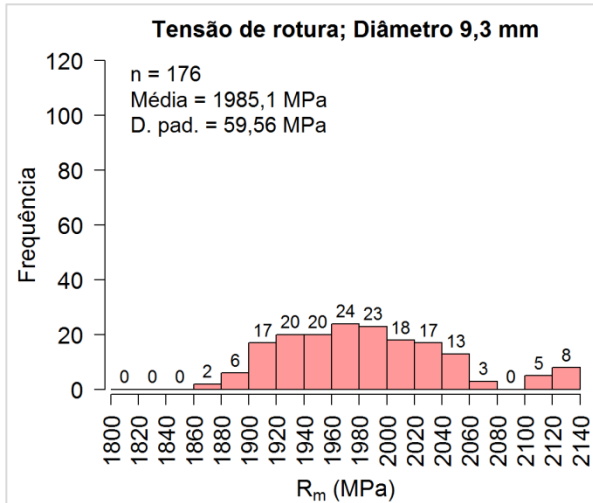


Figura 1. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 9,3 mm de diâmetro.

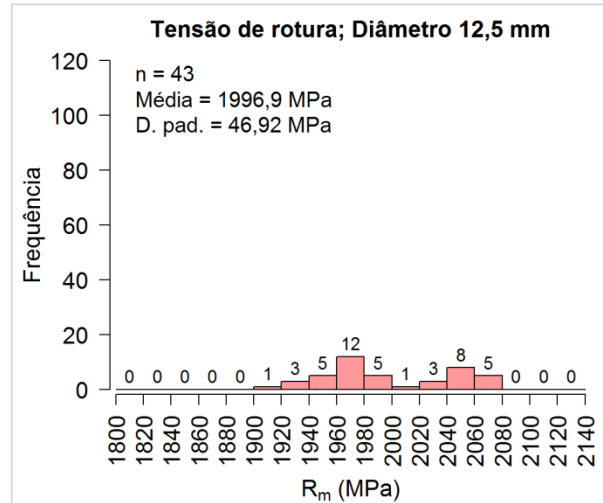


Figura 2. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 12,5 mm de diâmetro.

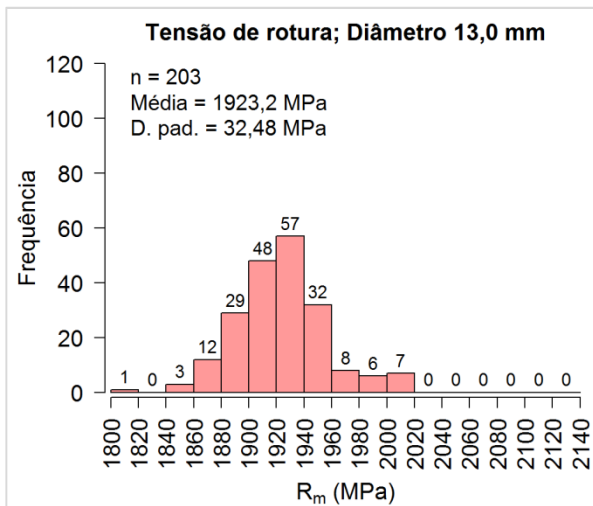


Figura 3. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 13,0 mm de diâmetro.

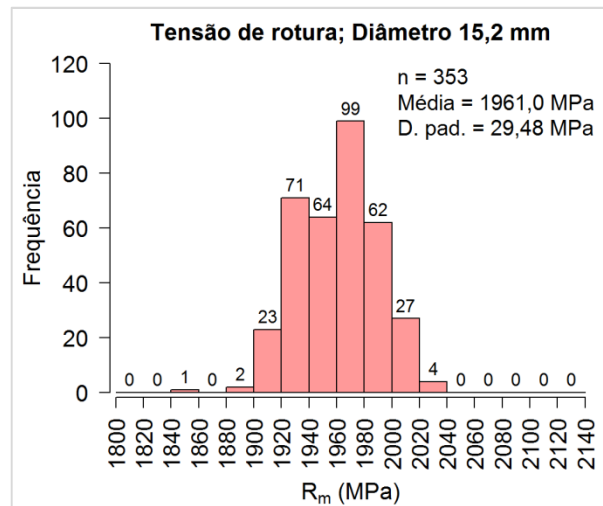


Figura 4. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,2 mm de diâmetro.

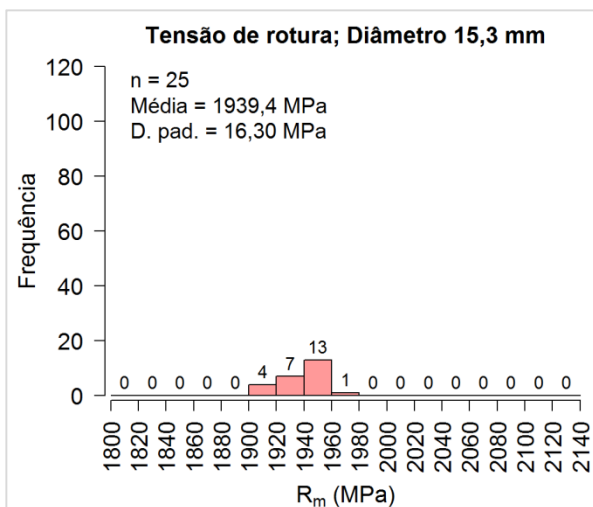


Figura 5. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,3 mm de diâmetro.

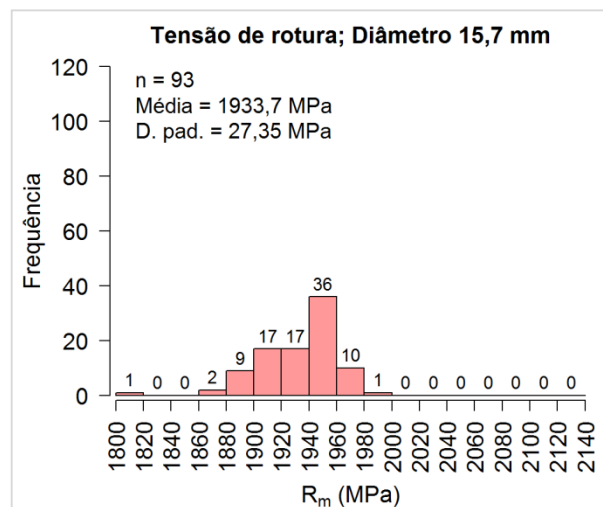


Figura 6. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,7 mm de diâmetro.

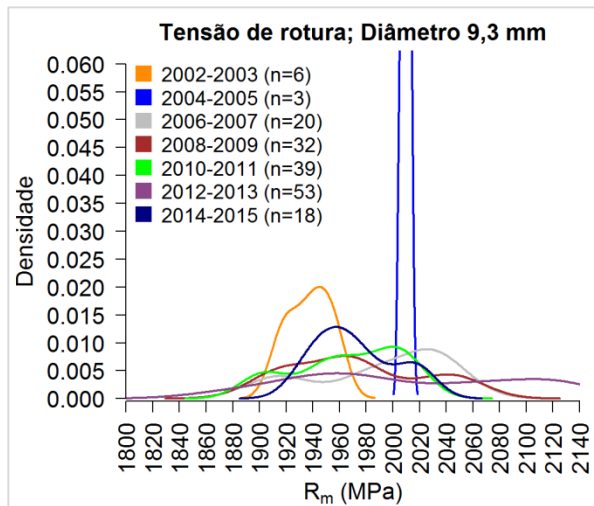


Figura 7. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 9,3 mm de diâmetro, ao longo do tempo

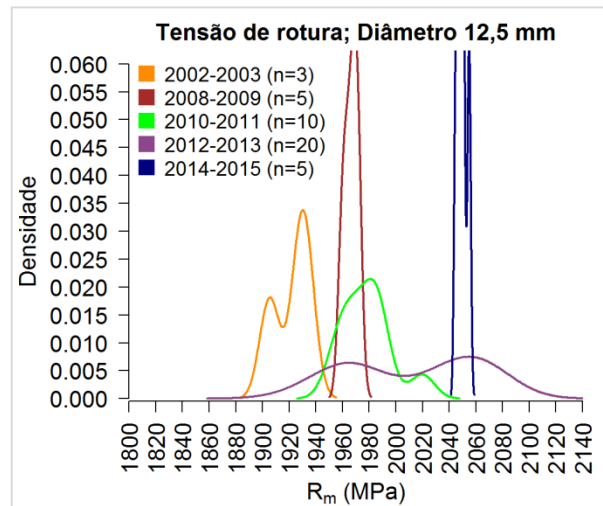


Figura 8. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 12,5 mm de diâmetro, ao longo do tempo

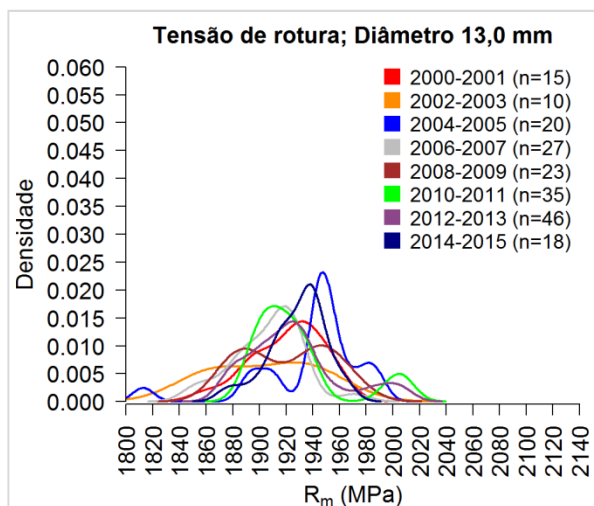


Figura 9. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 13,0 mm de diâmetro, ao longo do tempo

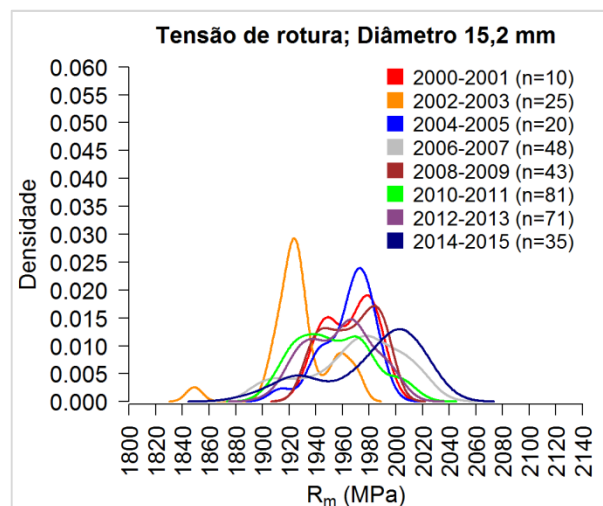


Figura 10. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,2 mm de diâmetro, ao longo do tempo

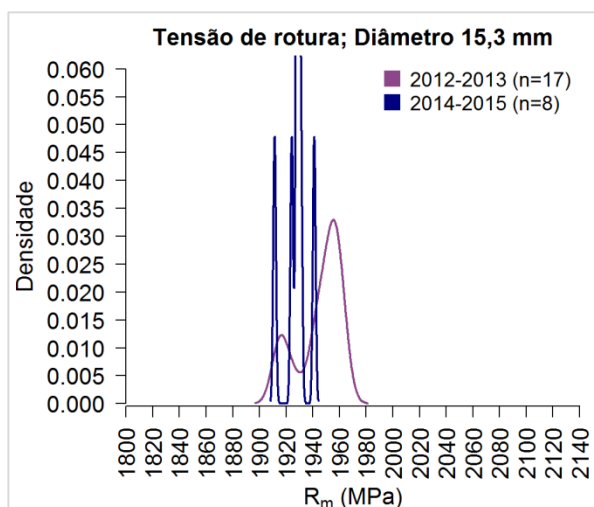


Figura 11. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,3 mm de diâmetro, ao longo do tempo

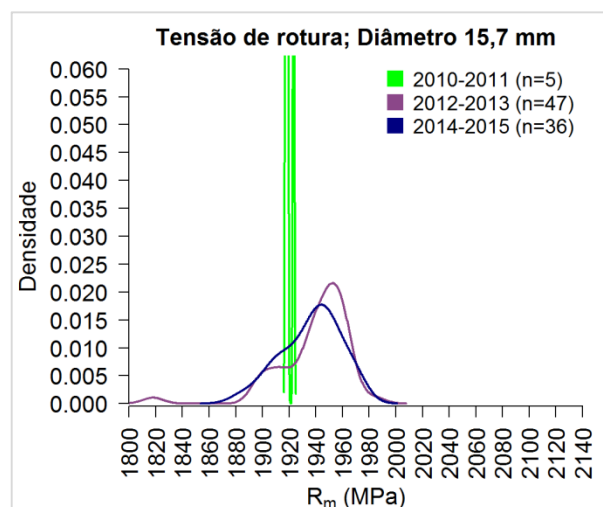


Figura 12. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões com 15,7 mm de diâmetro, ao longo do tempo

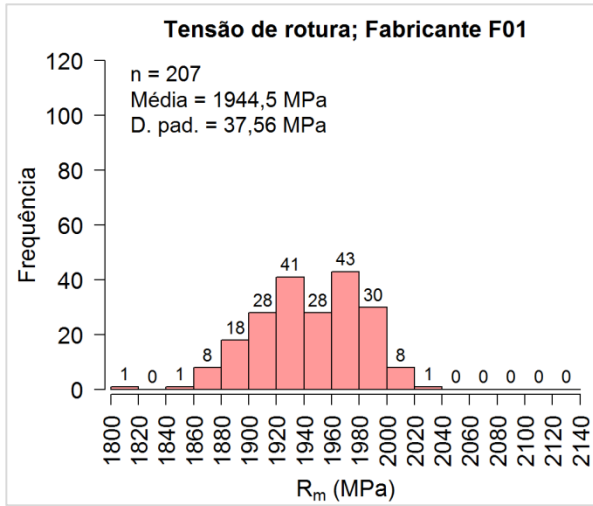


Figura 13. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F01.

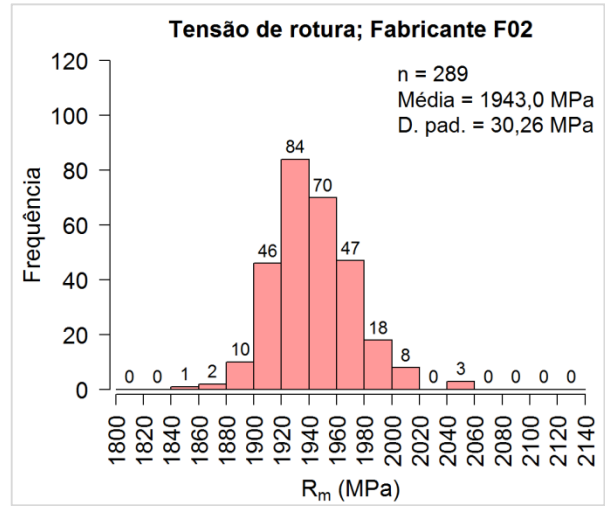


Figura 14. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F02.

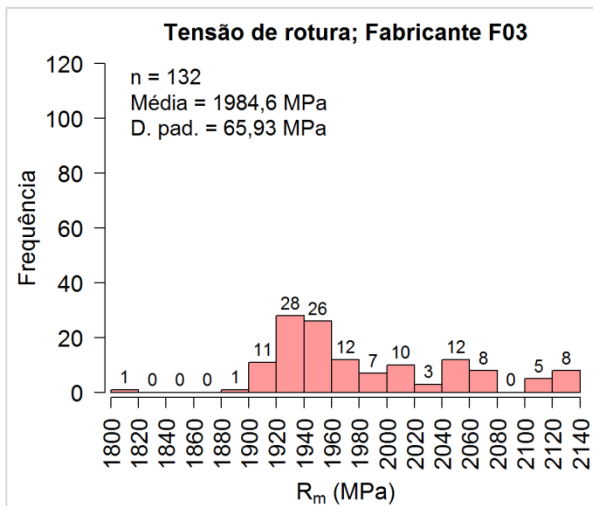


Figura 15. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F03.

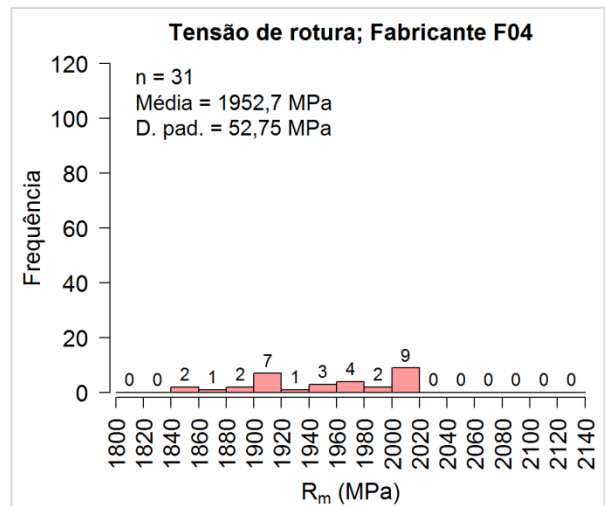


Figura 16. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F04.

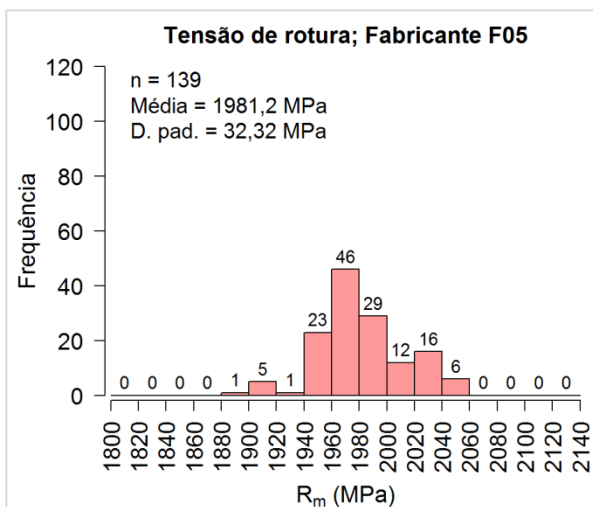


Figura 17. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F05.

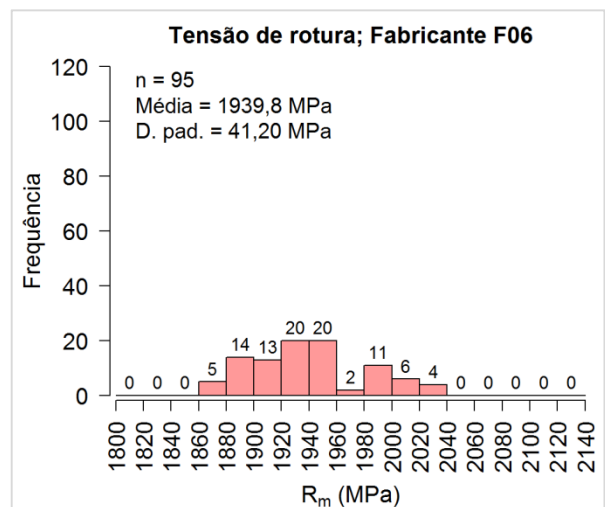


Figura 18. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões produzidos pelo fabricante F06.

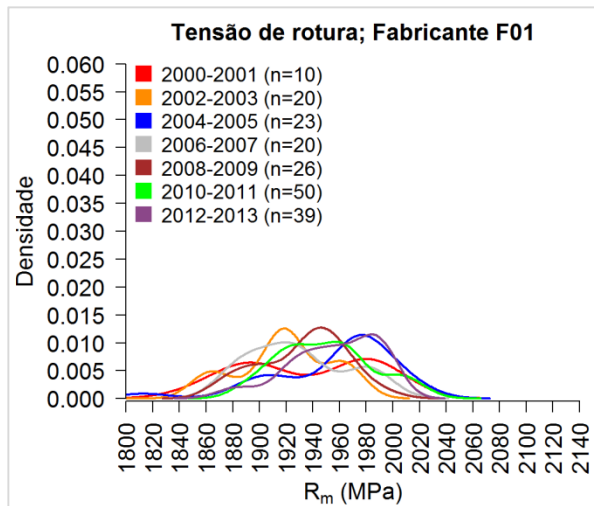


Figura 19. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F01, ao longo do tempo.

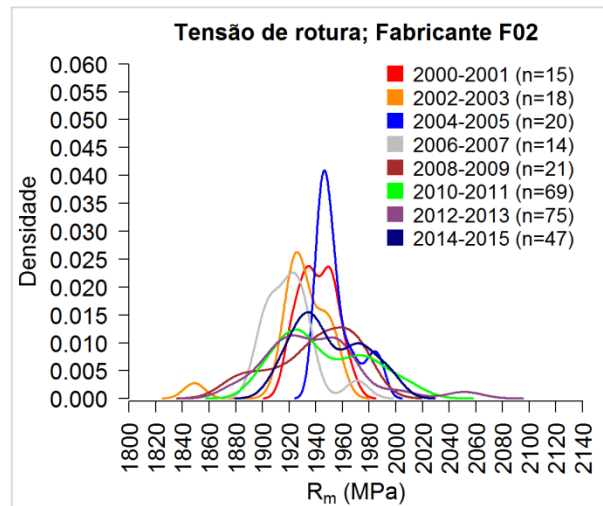


Figura 20. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F02, ao longo do tempo.

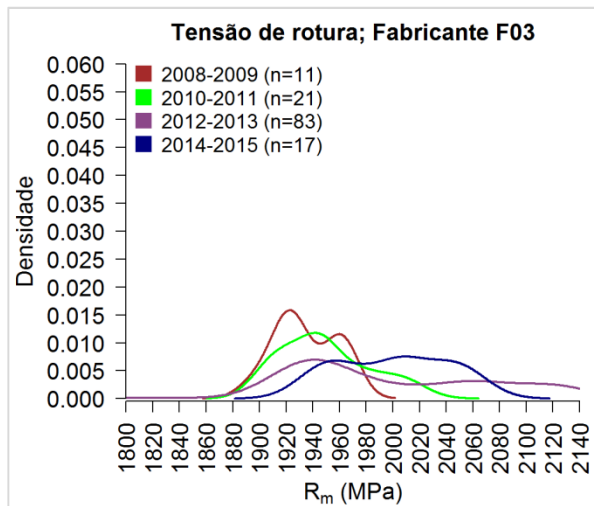


Figura 21. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F03, ao longo do tempo.

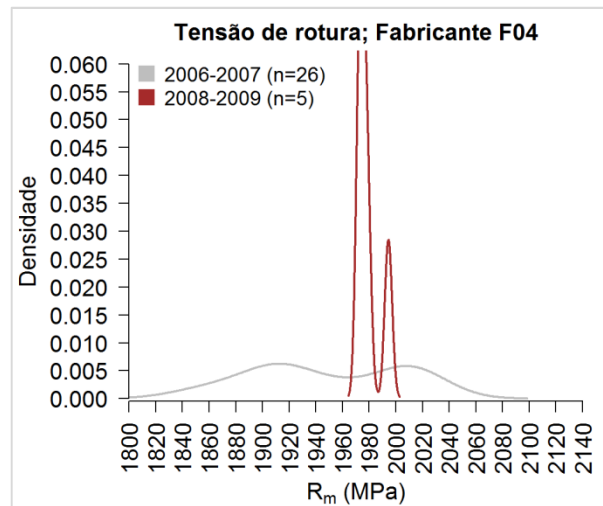


Figura 22. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F04, ao longo do tempo.

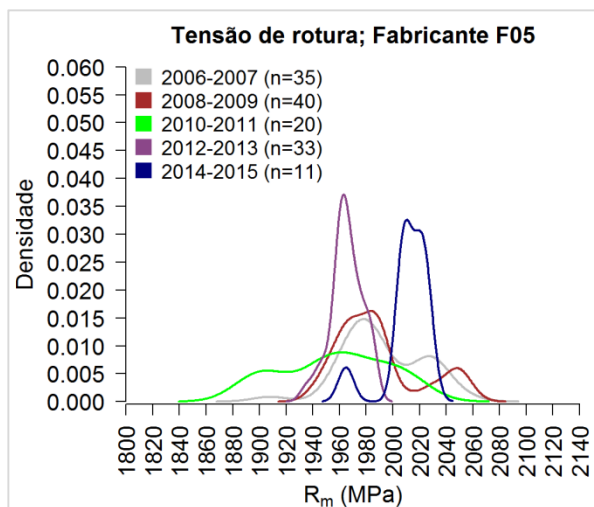


Figura 23. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F05, ao longo do tempo.

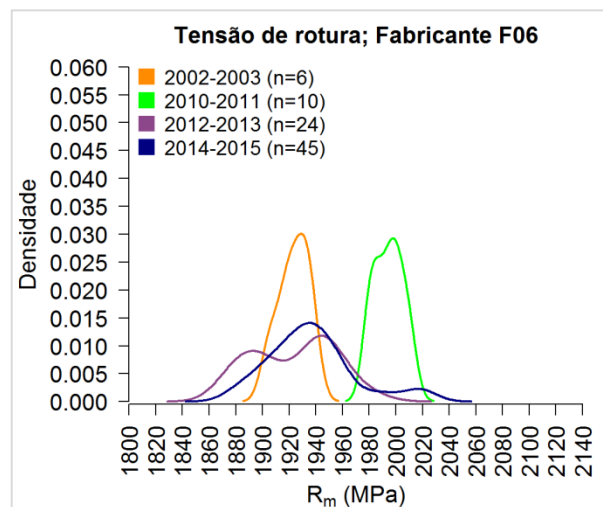


Figura 24. Valores da tensão de rotura obtidos para cordões do fabricante F06, ao longo do tempo.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Influência do diâmetro dos cordões

A Figura 1 mostra um histograma onde consta o número de cordões com 9,3 mm de diâmetro que apresentaram valores da tensão de rotura à tração compreendidos dentro de cada um dos dezassete intervalos nela indicados, entre 1800 MPa e 2140 MPa. O valor médio dos 176 resultados apresentados é de 1985,1 MPa e o seu desvio-padrão é de 59,56 MPa, sendo que 13 deles se encontram compreendidos entre 2100 MPa e 2140 MPa. Todos os valores individuais de R_m são superiores ao valor nominal (1860 MPa) prescrito na Especificação LNEC E 453 [2] para esta classe de resistência do aço de pré-esforço.

As Figuras 3, 4 e 6 são semelhantes à Figura 1, e referem-se aos cordões com diâmetros de 13,0 mm, 15,2 mm e 15,7 mm. O valor médio de R_m oscila, nestes casos, entre 1923,2 MPa e 1961,0 MPa, e os respetivos desvios-padrão variam entre 27,35 MPa e 32,48 MPa. Assinala-se a ocorrência de um resultado inferior a 1860 MPa, nos casos dos cordões com 15,2 mm e 15,7 mm de diâmetro, e de 4 resultados também inferiores a 1860 MPa, no caso dos cordões com 13,0 mm de diâmetro.

A Figura 2 refere-se aos cordões com 12,5 mm de diâmetro; é possível constatar a sobreposição de duas distribuições distintas que resultam de proveniências distintas dos cordões e da evolução desta característica ao longo do tempo, como se pode observar na Figura 8. Acresce a influência da pequena dimensão (apenas 43 valores) do conjunto de resultados referentes a este diâmetro.

A Figura 5 refere-se aos cordões com 15,3 mm de diâmetro; o conjunto de resultados disponível para este diâmetro é ainda mais reduzido (apenas 25 valores), facto que estará na origem da baixa dispersão destes resultados, uma vez que o seu desvio-padrão (16,30 MPa) é bastante inferior ao determinado para os outros cinco diâmetros de cordões. Tal como para os cordões com 12,5 mm de diâmetro, não foram registados, neste caso, quaisquer valores de R_m inferiores a 1860 MPa.

O diâmetro dos cordões aparenta ter alguma influência (se bem que moderada) na distribuição dos valores da sua tensão de rotura à tração, como se pode constatar através da comparação das Figuras 1, 3 e 4. Embora os desvios-padrão das distribuições apresentadas sejam relativamente baixos, salientam-se as diferenças elevadas entre os valores extremos de cada distribuição, que podem diferir entre si até 280 MPa.

Por último, importa referir que os valores característicos de 5% de cada uma das distribuições apresentadas nas Figuras 1 a 6, calculados para um nível de confiança de 95% e tendo em conta o número de resultados analisados em cada uma destas figuras, variam entre 1863,6 MPa e 1909,3 MPa. Portanto, todos estes valores característicos se situam acima do valor nominal (1860 MPa) prescrito na Especificação LNEC E 453 [2] para esta classe de resistência do aço de pré-esforço.

No entanto, os valores característicos correspondentes aos três diâmetros mais baixos são cerca de 20 MPa a 40 MPa inferiores aos valores característicos correspondentes aos três diâmetros mais elevados.

3.2. Variação da influência do diâmetro dos cordões ao longo do tempo

A Figura 7 apresenta as curvas de densidade dos valores de R_m dos cordões de aço com 9,3 mm de diâmetro, ao longo de cada um de oito biénios sucessivos compreendidos entre os anos de 2000 e 2015. Para cada um destes biénios é também indicada a quantidade de ensaios (n) realizados nesse período de tempo.

É possível constatar que estas curvas são bastante variáveis ao longo dos oito biénios, facto este que estará, em grande parte, associado às diferenças entre os números de resultados disponíveis para cada biénio. Ainda assim, é possível supor que, para além das diferentes proveniências dos cordões ensaiados em cada biénio, as diferenças verificadas poderão também resultar de variações nos processos de fabrico utilizados ao longo do período de tempo considerado.

No caso dos cordões com 13,0 mm de diâmetro (Figura 9), as curvas de densidade dos valores de R_m são também diferentes, embora as zonas de maior densidade dos resultados se encontrem mais próximas entre si. No caso dos cordões com 15,2 mm de diâmetro (Figura 10), as curvas de densidade dos valores de R_m são bastante mais homogêneas, com exceção do biénio 2002-2003, em que a maior densidade ocorre para valores mais baixos de R_m (cerca de 1920 MPa), e do biénio 2014-2015, em que a maior densidade ocorre para valores mais elevados de R_m (cerca de 2010 MPa).

Nos casos dos cordões com 15,3 mm e 15,7 mm de diâmetro existem poucos resultados disponíveis, os quais dizem respeito, essencialmente, apenas aos dois últimos biénios. As curvas de densidade referentes a estes biénios são relativamente semelhantes, verificando-se uma maior densidade de resultados para valores mais baixos de R_m (próximos de 1920 MPa) no caso dos cordões com 15,3 mm referentes a 2012 e 2013, e no caso dos cordões com 15,7 mm referentes a 2010 e 2011. Nos restantes casos, a densidade mais elevada ocorre na vizinhança de 1950 MPa.

Finalmente, constata-se uma vez mais que existem poucos resultados referentes ao diâmetro de 12,5 mm; neste caso as diferenças entre as zonas de maior densidade de resultados são bastante mais notórias.

Em resumo, constata-se a existência de curvas de densidade diferentes dos valores de R_m ao longo do tempo, entre 2002 e 2015. Para um mesmo biénio, as curvas correspondentes a diferentes diâmetros podem também ser muito diferentes entre si.

3.3. Variação da produção em função do fabricante

A Figura 13 apresenta um histograma onde consta o número de cordões, produzidos pelo Fabricante F01, com os seis diâmetros analisados nas Figuras 1 a 12 (9,3 mm, 12,5 mm, 13,0 mm, 15,2 mm, 15,3 mm, e 15,7 mm), que apresentaram valores da tensão de rotura à tração compreendidos dentro de cada um dos dezassete intervalos indicados nesta figura, entre 1800 MPa e 2140 MPa. O valor médio dos 207 resultados apresentados é de 1944,5 MPa e o seu desvio-padrão é de 37,56 MPa, sendo que 2 deles são inferiores a 1860 MPa.

As Figuras 14 e 17 são semelhantes, e referem-se aos cordões produzidos pelos Fabricantes F02 e F05, com os mesmos seis diâmetros analisados na Figura 13. O valor médio de R_m no caso do Fabricante F02 é de 1943,0 MPa, idêntico ao do Fabricante F01; no caso do Fabricante F05 o valor médio de R_m é igual a 1981,2 MPa, mais elevado que nos dois casos anteriores. Os desvios-padrão dos resultados dos Fabricantes F02 e F05 são idênticos: 30,26 MPa e 32,32 MPa respetivamente. Assinala-se ainda a ocorrência de 1 resultado inferior a 1860 MPa, no conjunto dos 289 resultados referentes ao Fabricante F02.

As Figuras 15, 16 e 18, referentes aos cordões produzidos pelos Fabricantes F03, F04 e F06, apresentam distribuições dos valores de R_m com dispersões mais elevadas; os seus desvios-padrão são iguais a 65,93 MPa, 52,75 MPa e 41,20 MPa, respetivamente. Por sua vez, os valores médios destas distribuições também diminuem progressivamente, sendo iguais a 1984,6 MPa, 1952,7 MPa e 1939,8 MPa, para os Fabricantes F03, F04 e F06 respetivamente.

Assinala-se a ocorrência de um resultado inferior a 1860 MPa no caso dos cordões produzidos pelo Fabricante F03, e de dois resultados inferiores a 1860 MPa referentes a cordões produzidos pelo Fabricante F04.

Os valores característicos de 5% de cada uma das distribuições apresentadas nas Figuras 13 a 18, calculados para um nível de confiança de 95% e tendo em conta o número de resultados analisados em cada uma destas figuras, variam entre 1836,2 MPa e 1920,5 MPa. De todos eles, apenas o referente ao Fabricante F04 (1836,2 MPa) é inferior ao valor nominal (1860 MPa) prescrito na Especificação LNEC E 453 [2].

Este facto decorre da elevada dispersão dos resultados do Fabricante F04 e, por outro lado, da dimensão muito inferior do conjunto de resultados disponíveis (apenas 31 valores) em relação aos dos restantes fabricantes, para os quais se dispõe de 95 a 289 resultados. Assinala-se que, embora no caso do Fabricante F01 também tenham sido detetados dois resultados inferiores a 1860 MPa, o valor característico de 5% referente a este fabricante é de 1875,6 MPa, respeitando o valor nominal de 1860 MPa atrás referido.

De acordo com os resultados apresentados, constata-se que as distribuições dos valores da tensão de rotura à tração dos cordões de aço para pré-esforço dependem bastante da sua origem.

O número de resultados insatisfatórios obtidos para cada um dos fabricantes é, em geral, muito reduzido: apenas dois resultados inferiores a 1860 MPa para os Fabricantes F01 e F04, um único resultado não conforme para os Fabricantes F02 e F03, e nenhum resultado insatisfatório no caso dos Fabricantes F05 e F06.

Os valores médios dos seis fabricantes variam entre 1939,8 MPa e 1984,6 MPa, sendo os mais elevados os dos Fabricantes F03 e F05. No entanto, o valor característico de 5% do Fabricante F03 é relativamente baixo (1860,2 MPa), devido ao valor elevado do desvio-padrão correspondente. Já o Fabricante F05 apresenta o valor característico de 5% mais elevado (1920,5 MPa), graças ao baixo valor do seu desvio-padrão.

3.4. Variação da produção ao longo do tempo em função do fabricante

A Figura 19 apresenta as curvas de densidade dos valores de R_m dos cordões produzidos pelo Fabricante F01, com os seis diâmetros analisados nas Figuras 1 a 12 (9,3 mm, 12,5 mm, 13,0 mm, 15,2 mm, 15,3 mm, e 15,7 mm), ao longo de cada um de oito biénios sucessivos compreendidos entre os anos de 2000 e 2015. Para cada um destes biénios é também indicada a quantidade de ensaios (n) realizados nesse período de tempo.

Para alguns dos fabricantes não existe informação disponível referente a cada um dos oito biénios indicados. No caso do fabricante F05, por exemplo, existem resultados referentes a cinco dos oito biénios, entre 2006 e 2015, enquanto que para os fabricantes F03 e F06 apenas existem resultados referentes a quatro biénios, estando três deles compreendidos entre 2010 e 2015. Por último, assinala-se que no caso do fabricante F04 só existem resultados de dois biénios, sendo os referentes ao período de 2008 a 2009 muito escassos ($n=5$).

É possível constatar que todas estas curvas apresentam dispersões bastante significativas e que os valores de R_m para os quais se verificam densidades mais elevadas variam muito de um biénio para outro; veja-se, por exemplo, as curvas das Figuras 21 e 22, referentes aos Fabricantes F03 e F04. Neste último caso, a baixa dispersão observada para o biénio de 2008-2009 resulta, aparentemente, do muito baixo número de resultados disponíveis para este período ($n=5$).

Nos restantes casos, referentes aos Fabricantes F02, F05 e F06, é possível observar uma situação mista; existem biénios cujas curvas apresentam dispersões bastante elevadas e outros onde a dispersão das curvas é bastante mais reduzida. Porém, mesmo nestes casos, verifica-se que os valores de R_m para os quais se verificam densidades mais elevadas variam muito de um biénio para outro (veja-se as Figuras 23 e 24, por exemplo). Estas diferenças poderão também resultar, em parte, do reduzido número de resultados disponíveis para alguns dos biénios analisados, embora este facto não pareça, por si só, ser suficiente para as explicar.

Sendo assim, é possível supor que os processos de fabrico dos cordões de aço para pré-esforço de cada um dos fabricantes, em particular, irão variando ao longo do tempo, dando origem às diferenças observadas entre as distribuições de resultados registados. Também para um mesmo biénio, as curvas correspondentes a diferentes fabricantes podem ser muito diferentes entre si.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos valores da tensão de rotura à tração (R_m) de cordões de aço da classe de resistência 1860, formados por seis fios do mesmo diâmetro nominal enrolados helicoidalmente em torno de um fio central reto. Os resultados experimentais analisados foram recolhidos pelo LNEC ao longo das duas últimas décadas, no âmbito do controlo periódico deste tipo de produto.

É possível constatar que a quase totalidade dos valores de R_m analisados são superiores ao valor nominal (1860 MPa) prescrito na Especificação LNEC E 453 [2] para esta classe de resistência do aço de pré-esforço. Apenas 6 dos 893 resultados analisados são inferiores a 1860 MPa. A média destes 893 resultados, provenientes dos seis fabricantes diferentes, é de 1958 MPa.

No seu conjunto, estes resultados são muito satisfatórios. No entanto, é necessário ter em conta que a sua distribuição depende de vários fatores, tais como o diâmetro dos cordões, a sua proveniência ou o ano em que foram produzidos, por exemplo.

Com efeito, constatou-se que o valor característico de 5% das distribuições de R_m é inferior (20 MPa a 40 MPa mais baixo) no caso dos cordões com menores diâmetros (9,3 mm, 12,5 mm e 13,0 mm), devido sobretudo à maior dispersão dos resultados correspondentes. No entanto, verificou-se que esta relação é variável ao longo do tempo durante o período analisado, entre os anos de 2000 e 2015.

Os resultados diferem também bastante com o fabricante dos cordões e, para cada fabricante, variam ao longo do tempo, entre 2000 e 2015. O valor característico de 5% das distribuições de R_m varia entre 1836,2 MPa e 1920,5 MPa, dependendo da origem dos cordões. No caso de um dos seis fabricantes este valor característico é inferior ao valor nominal (1860 MPa) prescrito na Especificação LNEC E 453 [2]; este facto resulta, em grande parte, da pequena dimensão do conjunto de resultados disponíveis referentes a este fabricante (apenas 31 dos 893 resultados analisados), e da sua dispersão elevada, incluindo 2 resultados individuais inferiores a 1860 MPa.

As variações observadas justificam a necessidade do controlo de um número significativo de amostras, referentes a cada unidade de produção, de modo a se poder garantir, com um nível de confiança adequado, que esta respeita os requisitos da Especificação LNEC aplicável a este produto [2], à semelhança do que acontece com a generalidade da produção dos cordões de aço para pré-esforço.

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] Especificação LNEC E 453:2011 Cordões de aço para pré-esforço. Características e ensaios, 4 p.
- [3] Baptista, A.M. (1990) Ensaio de cordões de aço para pré-esforço. Novas técnicas desenvolvidas no LNEC, 2^o Encontro Nacional sobre Análise Experimental de Tensões, LNEC, p. 4.57-4.68.