

Fios de aço para pré-esforço. Controlo da sua ductilidade através de ensaios de dobragem alternada no âmbito de Ações de Certificação.



**António Manuel
Baptista ¹**



João Filipe ²

RESUMO

A ductilidade dos materiais é uma das principais características mecânicas exigidas aos produtos utilizados em armaduras para betão estrutural. No caso particular dos fios de aço para aplicação de pré-esforço, esta característica é controlada essencialmente através de ensaios de tração e de ensaios de dobragem alternada.

Em Portugal, a colocação no mercado de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão pré-esforçado depende do controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) assegura o apoio técnico à realização destas ações que, no caso dos fios de aço para pré-esforço, envolvem a realização de ensaios de dobragem alternada, entre outros.

A análise dos resultados dos ensaios de dobragem alternada realizados pelo Fabricante dos fios (ensaios de verificação do produto) e pelo LNEC (ensaios de acompanhamento), sobre amostras colhidas no âmbito das referidas Ações de Acompanhamento da Certificação, tem revelado que estes resultados apresentam dispersões muito elevadas.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos resultados de cerca de quatro mil e oitocentos ensaios de dobragem alternada de fios de aço para pré-esforço, obtidos no âmbito do controlo periódico deste produto ao longo de vinte e dois anos, bem como uma análise da sua conformidade com as exigências que lhes são aplicáveis.

Este estudo permitiu constatar a influência de diversos parâmetros, tais como o diâmetro dos fios, a sua classe de resistência, o seu fabrico e a entidade que executou os ensaios. Foi ainda possível verificar que as distribuições estatísticas anuais dos resultados obtidos têm vindo a variar ao longo do tempo, durante o período considerado neste estudo.

Palavras-chave: Betão estrutural / Certificação / Fios de aço para pré-esforço / Ductilidade / Dobragem alternada / 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 ductilidade dos materiais é uma das principais características mecânicas exigidas aos produtos utilizados em armaduras para betão estrutural. No caso particular dos fios de aço para aplicação de pré-esforço, esta característica é controlada essencialmente através do valor da extensão total na força máxima, A_{gt} , obtido através do ensaio de tração, e do ensaio de dobragem alternada.

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 [1]. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das respetivas Ações de Acompanhamento da Certificação.

O controlo periódico da produção dos fios de aço para pré-esforço envolve a análise do número de dobragens alternadas (N_b) suportadas pelos fios amostrados no âmbito das referidas Ações de Acompanhamento da Certificação. A experiência deste controlo tem revelado que a resistência à dobragem alternada destes fios de aço pode apresentar dispersões elevadas, resultantes de vários fatores, tais como o diâmetro dos fios, a sua proveniência (fabricante, método de fabrico utilizado e respetivo lote de produção) ou o procedimento de ensaio utilizado na sua determinação, por exemplo.

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos resultados dos ensaios de dobragem alternada obtidos no âmbito do controlo periódico deste produto, bem como uma análise da sua conformidade com as exigências que lhe são aplicáveis.

2. O ENSAIO DE DOBRAGEM ALTERNADA DE FIOS DE AÇO PARA PRÉ-ESFORÇO

O ensaio de dobragem alternada de fios de aço destinados a serem utilizados na aplicação de pré-esforço em elementos de betão estrutural deve ser realizado, em Portugal, segundo a Especificação LNEC E 452:2011 [2]. Basicamente, o ensaio de dobragem alternada consiste em submeter um provete fixo numa extremidade a sucessivas dobragens a 90°, alternadamente num e noutro sentido [3]. Em particular, esta Especificação [2] fixa os diâmetros dos mandris sobre os quais é feita a dobragem, em função do diâmetro nominal dos fios de aço ensaiados.

O ensaio deve ser efetuado a uma velocidade constante, sem variações bruscas e sem exceder uma flexão por segundo. Se necessário, deve-se reduzir a velocidade de ensaio de modo a que o aquecimento provocado não afete os resultados.

O ensaio deve ser conduzido até se atingir a rotura do provete. O resultado do ensaio consiste na indicação do número de dobragens alternadas (N_b) que o provete conseguiu suportar, sem incluir a dobragem durante a qual ocorre a rotura. O número mínimo de dobragens alternadas sem rotura estabelecido na Especificação LNEC E 452:2011 [2] é de 4 dobragens para fios lisos e de 3 dobragens para fios indentados. Na sua grande maioria, os fios ensaiados são indentados.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados de ensaios de dobragem alternada de fios de aço analisados no âmbito deste trabalho foram obtidos ao longo de vinte e dois anos, entre 1996 e 2017. Estes ensaios foram realizados pelos Fabricantes e pelo LNEC sobre fios de aço das classes de resistência 1570 MPa, 1670 MPa, 1770 MPa e 1860 MPa [2], com diâmetros de 4,0 mm, 5,0 mm, 6,0 mm, 7,0 mm, 8,0 mm, 9,4 mm, 9,5 mm e 10,5 mm [2], produzidos por seis fabricantes diferentes. No total, foram analisados cerca de quatro mil e oitocentos resultados, 53% dos quais foram obtidos pelos Fabricantes e os restantes 47% foram obtidos pelo LNEC.

Os histogramas das Figs. 1 a 4 apresentam as distribuições dos resultados obtidos, entre 1996 e 2017, pelos seis Fabricantes e pelo LNEC, para fios com diâmetros de 4,0 mm, 5,0 mm, 6,0 mm e 7,0 mm, de todas as classes. Nestas figuras são ainda apresentados os valores das respetivas médias (\bar{x}) e desvios-padrão (σ).

As Figs. 5 e 6 apresentam histogramas com as distribuições dos resultados obtidos, entre 1996 e 2017, pelos seis Fabricantes e pelo LNEC, para fios de aço das classes 1770 MPa e 1860 MPa, incluindo todos os oito diâmetros atrás referidos. As Figs. 7 a 12 apresentam histogramas com as distribuições dos resultados obtidos, entre 1996 e 2017, por cada um dos seis fabricantes (designados através dos códigos F041, F043, F048, F049, F050 e F051) e pelo LNEC, para todos os oito diâmetros atrás referidos, de todas as classes.

Finalmente, as Figs. 13 a 30 apresentam histogramas com as distribuições dos resultados obtidos, no quadriénio de 1996 a 1999 e em cada um dos anos compreendidos entre 2000 e 2016, pelos seis Fabricantes e pelo LNEC, para fios de aço das quatro classes referidas, incluindo todos os oito diâmetros atrás indicados. Todas estas figuras incluem os valores médios e os desvios-padrão das distribuições de resultados obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Análise global dos resultados

No conjunto global dos resultados obtidos pelos Fabricantes, o valor médio do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) suportadas por cada fio de aço ensaiado foi de 7,1 e o correspondente desvio-padrão foi de 1,97 dobragens. É possível constatar que a dispersão dos resultados é muito elevada, sendo o coeficiente de variação desta distribuição de resultados igual a 28%.

No conjunto global dos resultados obtidos pelo LNEC, o valor médio do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) suportadas por cada fio de aço ensaiado foi de 6,5 e o correspondente desvio-padrão foi de 1,83 dobragens. O coeficiente de variação destes resultados é também igual a 28%. O facto de o valor médio destes resultados ser inferior ao valor médio dos resultados obtidos pelos fabricantes poderá estar associado a diferenças nos procedimentos de ensaio utilizados, nomeadamente ao nível da velocidade de ensaio e do ritmo com que as sucessivas dobragens são aplicadas.

O valor característico, determinado com um grau de confiança de 95%, referente ao quantilho de 10% da distribuição estatística dos valores de N_b correspondente aos resultados obtidos pelos Fabricantes, é de 4,3 dobragens; no caso dos resultados obtidos pelo LNEC, este valor característico é igual a 4,0 dobragens. Em ambos os casos, os valores obtidos respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011 [2].

4.2. Influência do diâmetro dos fios

Através das Figs. 1 a 4 é possível constatar que existem diferenças significativas entre as distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) obtidas para diferentes diâmetros (d) dos fios de aço. Os valores médios mais elevados foram obtidos para os fios com 5,0 mm de diâmetro (Fig. 2), enquanto que o valor médio mais baixo obtido pelo LNEC ocorreu para os fios com 6,0 mm de diâmetro (Fig. 3).

Além disso, as referidas distribuições variam também em função da origem dos resultados; em geral, os resultados obtidos pelos Fabricantes são mais elevados que os obtidos pelo LNEC. Por outro lado, a dispersão dos resultados obtidos pelo conjunto dos Fabricantes é quase sempre mais elevada que no caso dos resultados obtidos pelo LNEC, facto que poderá estar associado às diferenças entre equipamentos e procedimentos de ensaio utilizados pelos diversos fabricantes cobertos por este estudo.

Os valores característicos $N_{b,10\%}$ dos resultados obtidos pelos Fabricantes, referentes ao quantilho de 10% e determinados com um grau de confiança de 95%, variam entre $N_{b,10\%}=5,1$ dobragens, no caso de fios com 5,0 mm de diâmetro, e $N_{b,10\%}=3,5$ dobragens para os fios com 6,0 mm de diâmetro. No caso dos resultados obtidos pelo LNEC, estes valores característicos variam entre $N_{b,10\%}=4,5$ dobragens (para $d=5,0$ mm) e $N_{b,10\%}=3,1$ dobragens (para $d=6,0$ mm). Embora apresentem diferenças importantes entre si, em função do diâmetro e da origem dos resultados, estes valores característicos respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011 [2], uma vez que a superfície da generalidade dos fios ensaiados é indentada.

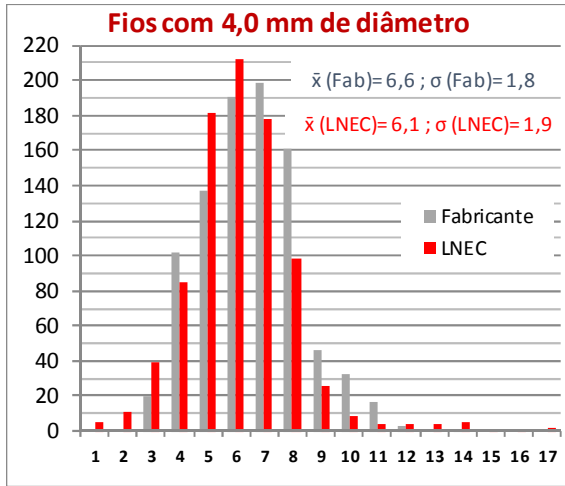


Figura 1. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios com $d=4,0$ mm.

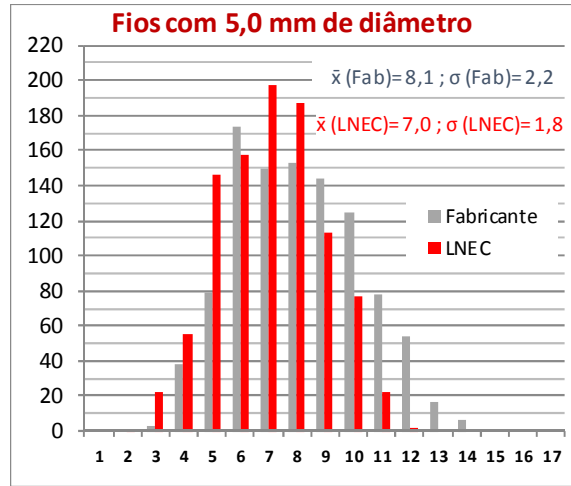


Figura 2. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios com $d=5,0$ mm.

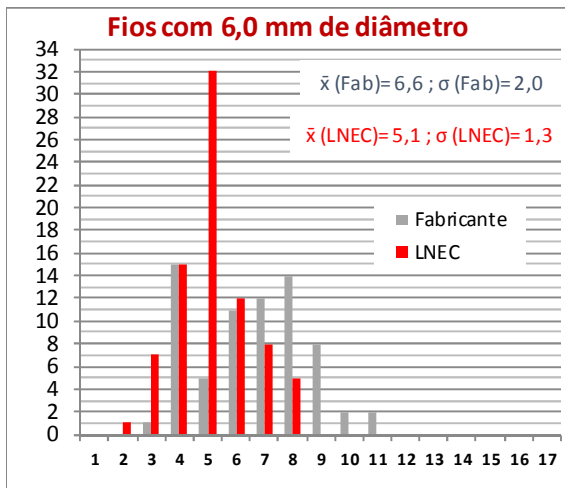


Figura 3. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios com $d=6,0$ mm.

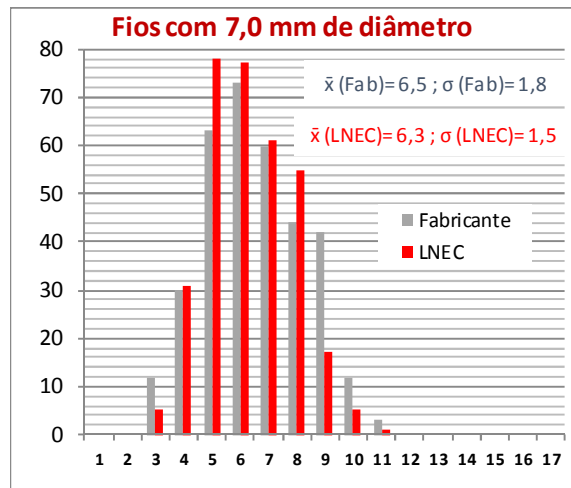


Figura 4. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios com $d=7,0$ mm.

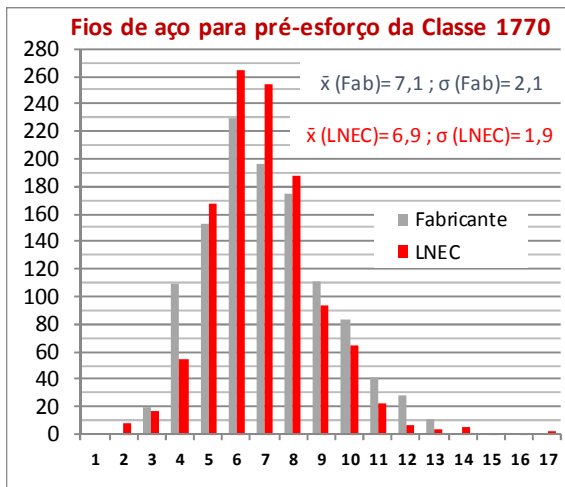


Figura 5. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios da Classe 1770.

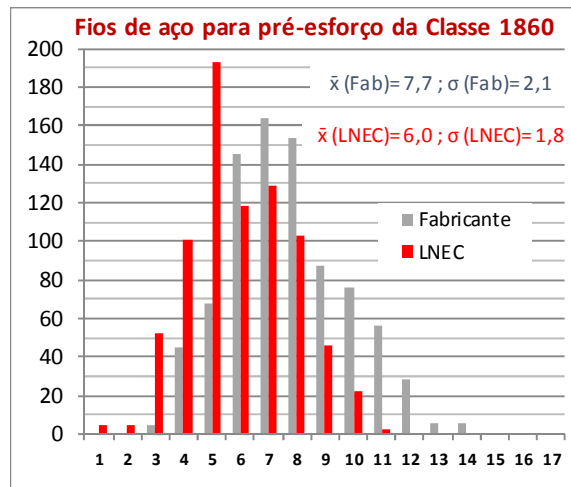


Figura 6. Distribuições do número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios da Classe 1860.

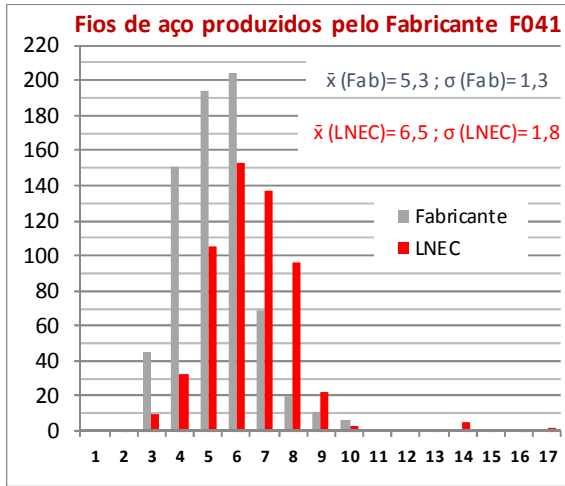


Figura 7. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F041.

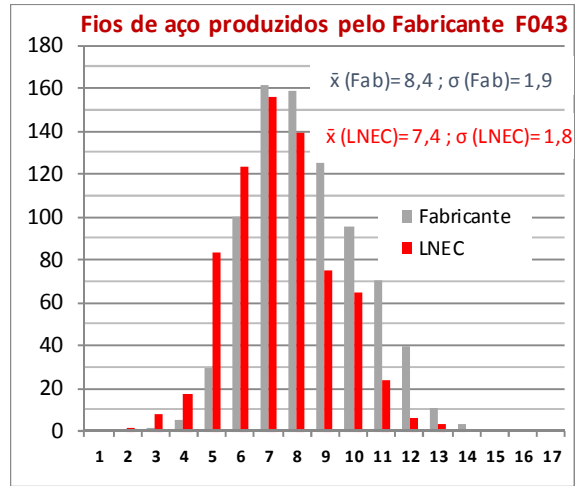


Figura 8. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F043.

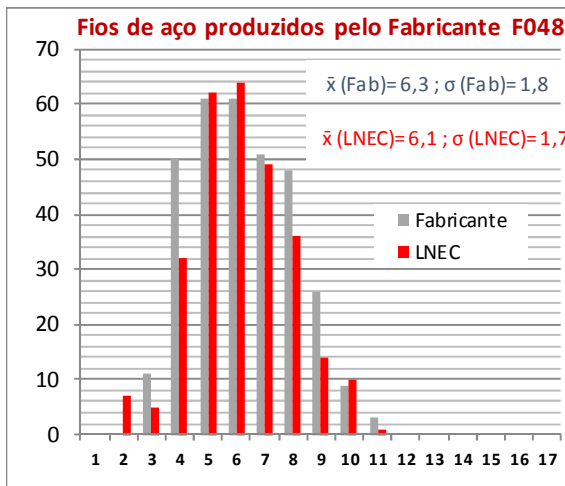


Figura 9. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F048.

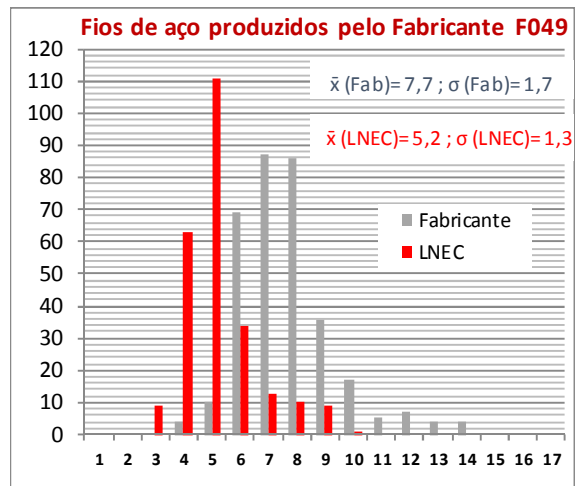


Figura 10. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F049.

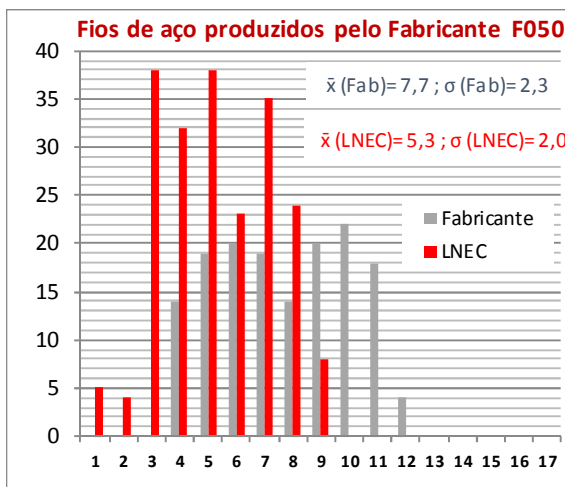


Figura 11. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F050.

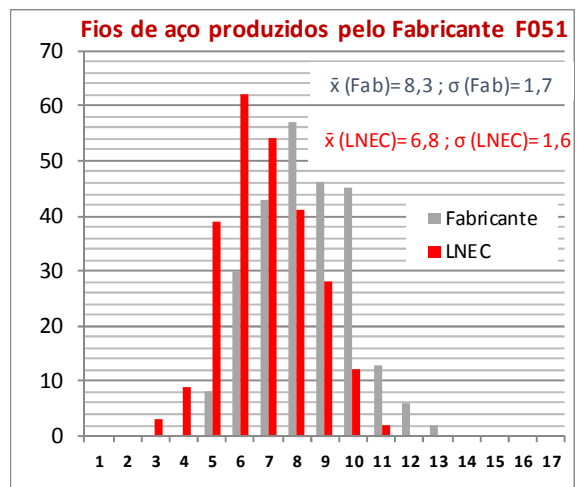


Figura 12. Número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) de fios produzidos pelo Fabricante F051.

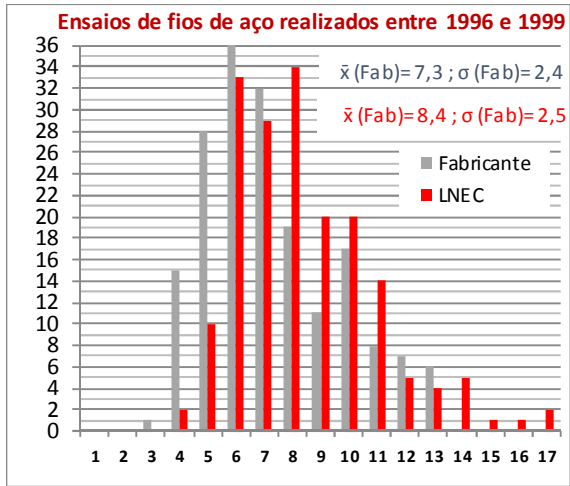


Figura 13. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC entre 1996 e 1999.

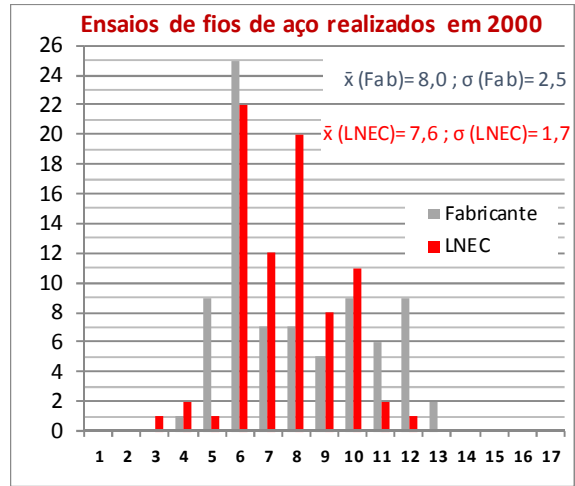


Figura 14. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2000.

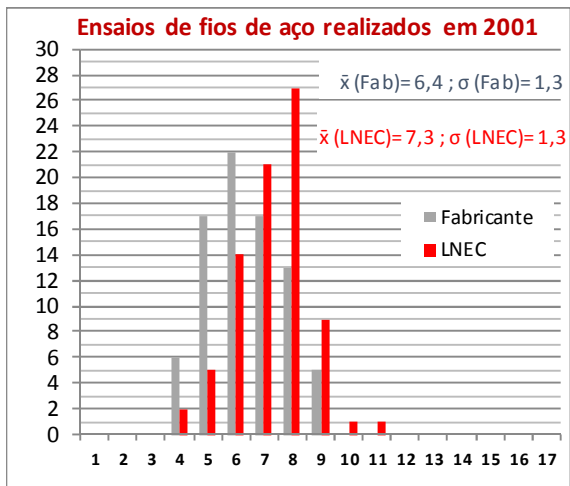


Figura 15. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2001.

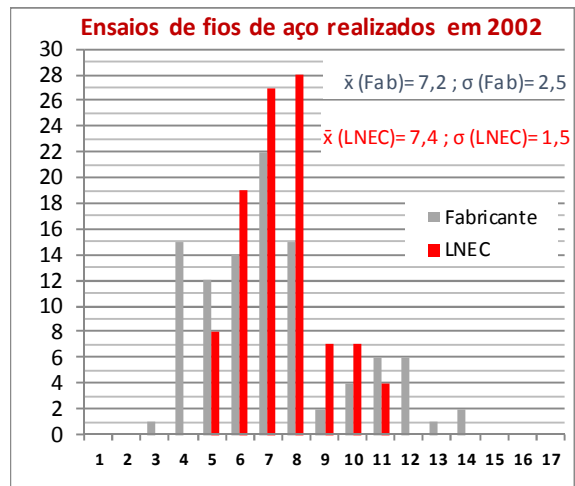


Figura 16. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2002.

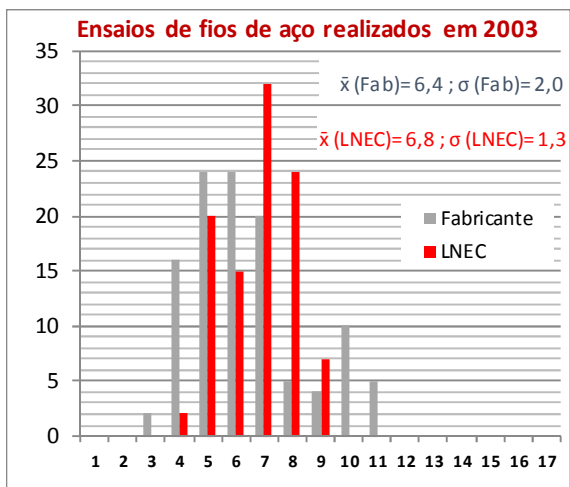


Figura 17. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2003.

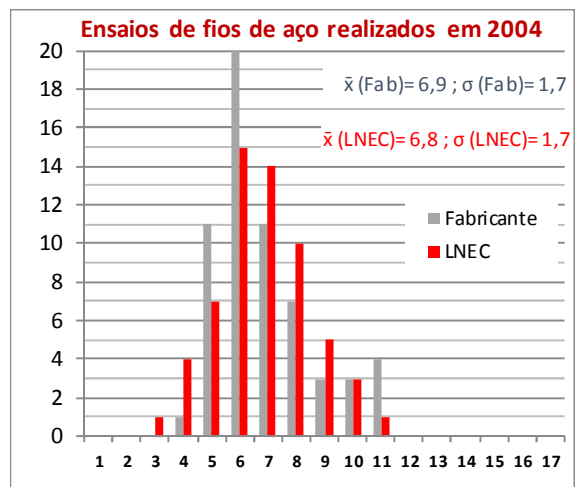


Figura 18. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2004.

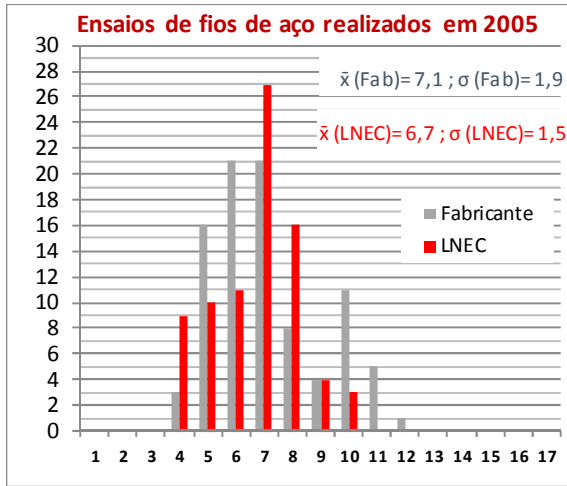


Figura 19. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2005.

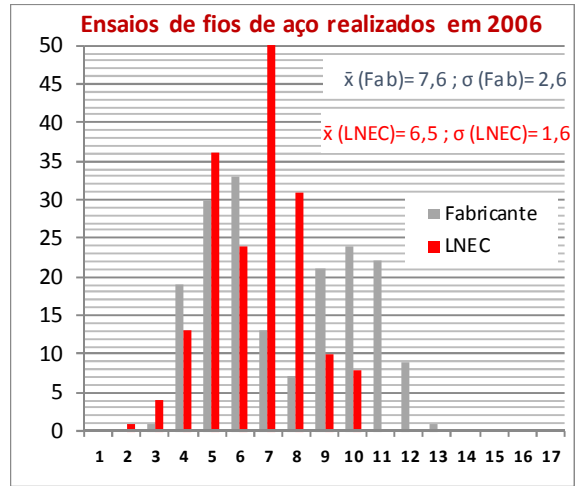


Figura 20. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2006.

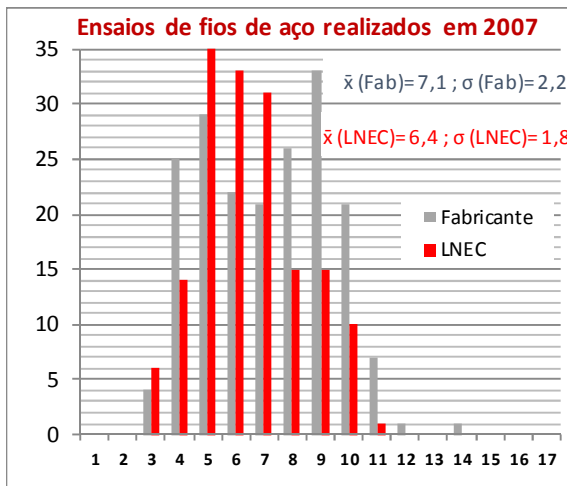


Figura 21. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2007.

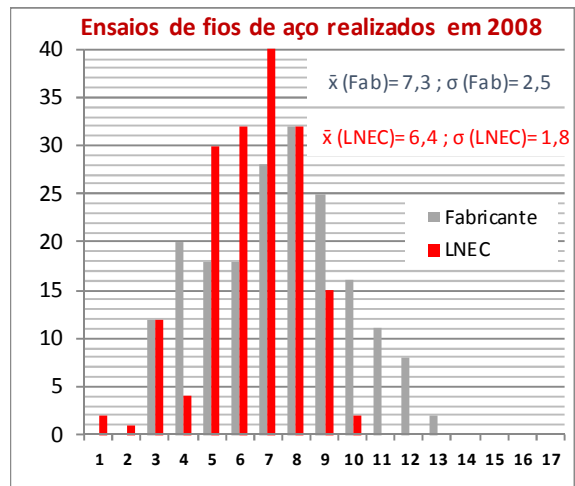


Figura 22. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2008.

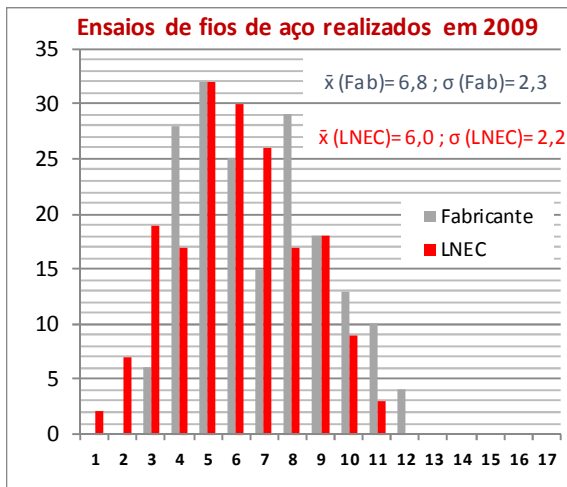


Figura 23. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2009.

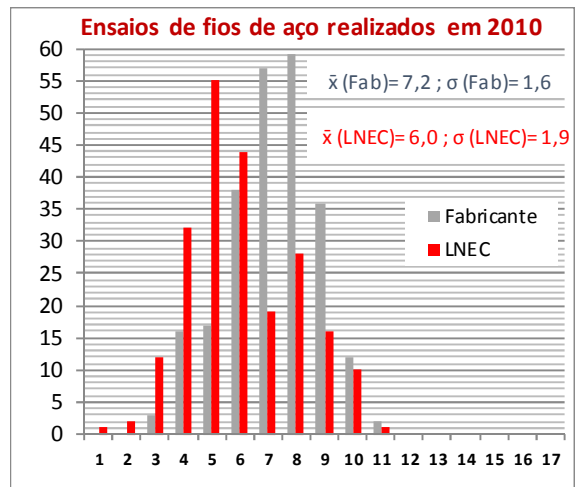


Figura 24. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2010.

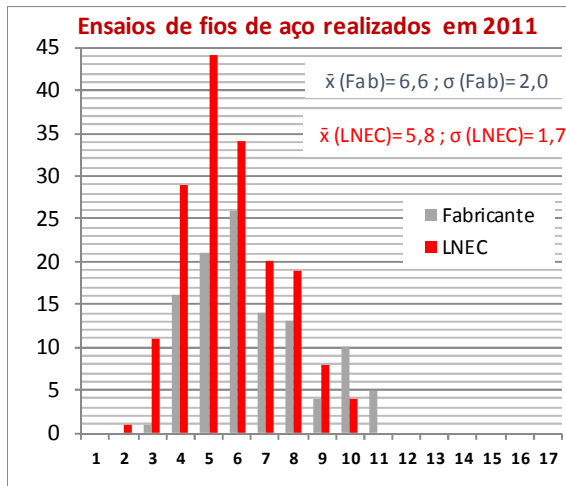


Figura 25. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2011.

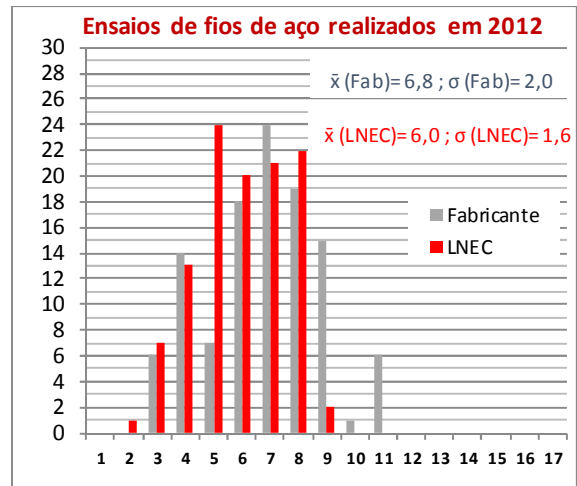


Figura 26. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2012.

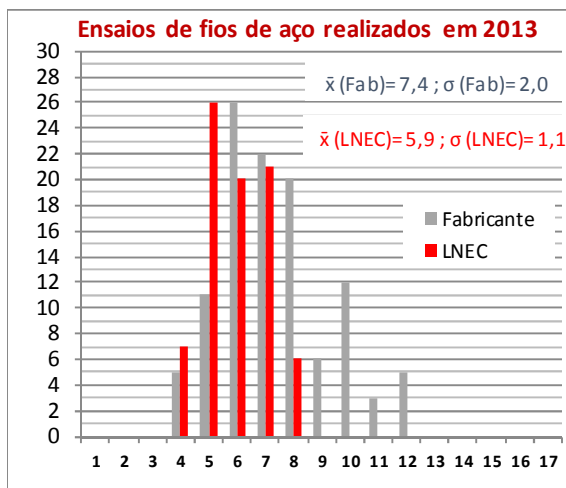


Figura 27. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2013.

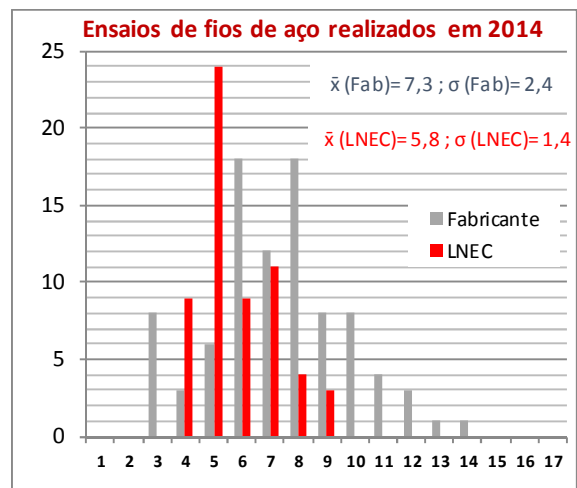


Figura 28. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2014.

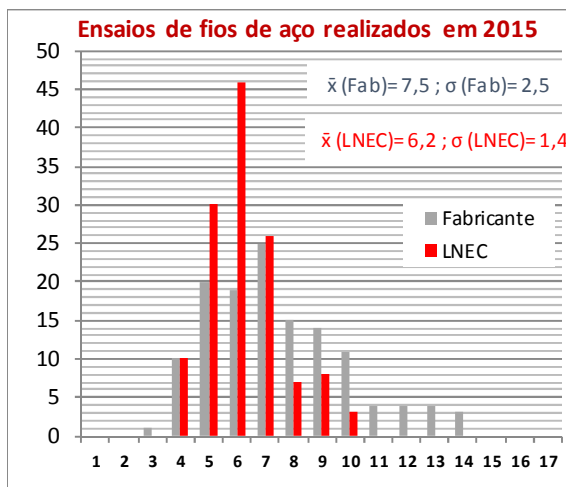


Figura 29. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2015.

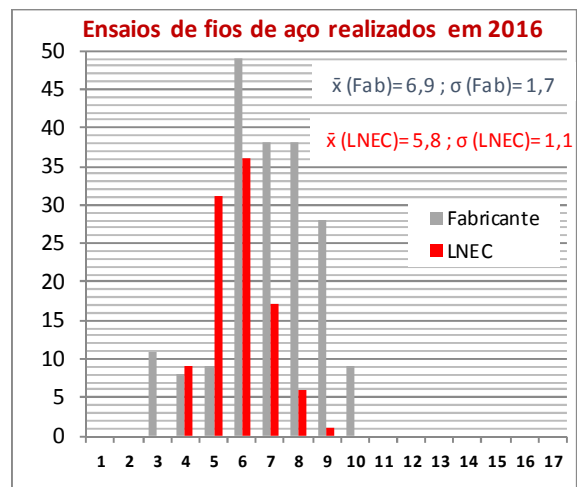


Figura 30. Dobragens alternadas (N_b) registadas em ensaios dos Fabricantes e do LNEC em 2016.

4.3. Influência da classe de resistência dos fios

A Fig. 5 mostra que não existem diferenças importantes entre o número de dobragens alternadas sem rotura (N_b) registado nos ensaios de fios de aço da Classe 1770 MPa realizados pelo Fabricantes e pelo LNEC. Porém, no caso dos fios de aço da Classe 1860 MPa existem diferenças muito significativas entre os resultados dos ensaios efetuados pelos Fabricantes e pelo LNEC.

No caso dos resultados obtidos pelos Fabricantes, os valores médios de N_b são iguais a 7,1 dobragens (Classe 1770 MPa) e a 7,7 dobragens (Classe 1860 MPa); no caso dos resultados obtidos pelo LNEC, os valores médios de N_b são iguais a 6,9 dobragens (Classe 1770 MPa) e a 6,0 dobragens (Classe 1860 MPa). As diferenças entre estes valores médios são muito superiores no caso da Classe 1860 MPa, embora os desvios-padrão dos resultados obtidos para os fios da Classe 1770 MPa sejam idênticos aos obtidos para os fios da Classe 1860 MPa, tanto pelos Fabricantes como pelo LNEC.

Por este motivo, os valores característicos $N_{b,10\%}$ referentes ao quantilho de 10% da distribuição dos valores de N_b , determinados com um grau de confiança de 95%, são iguais a $N_{b,10\%}=4,2$ dobragens e a $N_{b,10\%}=4,3$ dobragens, nos casos dos resultados obtidos, respetivamente, pelos Fabricantes e pelo LNEC, para os fios da Classe 1770 MPa; no caso dos fios da Classe 1860 MPa, os valores característicos dos resultados obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC são iguais a $N_{b,10\%}=4,8$ dobragens e a $N_{b,10\%}=3,5$ dobragens, respetivamente. Deste modo é possível constatar que todos estes valores característicos respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011 [2] (tendo em conta que a superfície da generalidade dos fios ensaiados é indentada), embora não seja possível estabelecer uma relação entre a classe dos fios e a sua resistência à dobragem alternada.

4.4. Influência da proveniência dos resultados

As Figs. 7 a 12 mostram a existência de dispersões muito significativas ao nível dos resultados obtidos por cada fabricante nos ensaios dos seus próprios fios (cujo coeficiente de variação varia entre 20% e 30%) e ao nível dos resultados obtidos pelo LNEC nos ensaios dos fios de cada um dos fabricantes (o seu coeficiente de variação varia entre 23% e 37%).

Existem também diferenças assinaláveis entre as distribuições de resultados referentes à produção de cada um destes Fabricantes: no caso dos resultados obtidos pelos próprios fabricantes, a média destas distribuições varia entre $N_{b,med}=5,3$ dobragens e $N_{b,med}=8,4$ dobragens (com uma diferença relativa de 57% entre estes dois valores extremos); no caso dos resultados obtidos pelo LNEC, a média destas distribuições varia entre $N_{b,med}=5,2$ dobragens e $N_{b,med}=7,4$ dobragens (a diferença relativa é de 42%).

Assinalam-se ainda diferenças importantes entre as distribuições de resultados dos ensaios de fios produzidos por cada Fabricante, realizados por esse Fabricante e pelo LNEC. Enquanto que estas duas distribuições são muito próximas no caso do Fabricante F048 (Fig. 9), por exemplo, existem outros casos em que essas distribuições são muito diferentes entre si, como nos casos dos resultados referentes ao Fabricante F049 (Fig. 10) e ao Fabricante F050 (Fig. 11). Em geral, o valor médio das distribuições dos resultados obtidos pelo LNEC é inferior ao das distribuições dos resultados obtidos pelo Fabricante, variando entre 68% e 98% deste último (exceto no caso do Fabricante F041, Fig. 7).

Os valores característicos $N_{b,10\%}$ referentes ao quantilho de 10% das distribuições de resultados dos ensaios realizados por cada Fabricante, determinados com um grau de confiança de 95%, variam entre $N_{b,10\%}=3,5$ dobragens e $N_{b,10\%}=5,9$ dobragens; no caso dos resultados obtidos pelo LNEC para os fios de aço produzidos por cada um destes Fabricantes, os valores característicos referidos variam entre $N_{b,10\%}=2,5$ dobragens e $N_{b,10\%}=4,9$ dobragens.

Tendo em conta que a superfície da generalidade dos fios ensaiados é indentada, todos estes valores característicos respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011, exceto no caso particular dos resultados obtidos pelo LNEC nos ensaios de fios de aço produzidos pelo Fabricante F050 (Fig. 11), devido ao seu valor médio relativamente baixo e à elevada dispersão destes resultados, que se traduzem no mais elevado coeficiente de variação (37%) de todas as distribuições de resultados apresentadas nas Figs. 7 a 12.

4.5. Evolução ao longo do tempo

As Figs. 13 a 30 revelam uma evolução ao longo do tempo das distribuições de resultados dos ensaios de dobragem alternada, obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC entre 1996 e 2016. Os valores médios anuais ($N_{b,med}$) atingiram os seus valores máximos ($N_{b,med,Fab}=9,0$ dobragens e $N_{b,med,LNEC}=9,8$ dobragens) no final do século passado. No início do séc. XXI os valores médios anuais baixaram e têm desde então mantido a mesma ordem de grandeza, com variações relativas (positivas ou negativas) inferiores a 10% entre anos consecutivos. Estas variações foram menores no caso dos resultados obtidos pelo LNEC; neste caso, os valores médios anuais mais baixos ($N_{b,med,LNEC}=5,8$ dobragens) foram registados ao longo desta última década. Durante os últimos quinze anos, os valores médios anuais dos resultados obtidos pelo conjunto dos Fabricantes foram, em geral, mais de 10% superiores aos dos resultados obtidos pelo LNEC.

Ao longo do séc. XXI, a dispersão dos resultados obtidos pelo conjunto dos Fabricantes foi praticamente sempre superior à dispersão dos resultados obtidos pelo LNEC, tendo as maiores diferenças relativas ocorrido durante esta última década. Este facto poderá estar associado às diferenças entre equipamentos e procedimentos de ensaio utilizados pelos diversos fabricantes cobertos por este estudo.

Os valores característicos anuais, referentes ao quantilho de 10% das distribuições de resultados dos ensaios realizados pelos Fabricantes, determinados com um grau de confiança de 95%, variam entre $N_{b,10\%}=3,3$ dobragens e $N_{b,10\%}=4,9$ dobragens; no caso dos resultados obtidos pelo LNEC, os valores característicos anuais atrás referidos variam entre $N_{b,10\%}=2,7$ dobragens e $N_{b,10\%}=5,4$ dobragens. Tendo em conta que a superfície da generalidade dos fios ensaiados é indentada, todos estes valores característicos respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011, exceto no caso particular dos resultados obtidos pelo LNEC em 2009 (em que $N_{b,10\%}=2,7$ dobragens), devido à elevada dispersão dos resultados obtidos nesse ano (Fig. 23).

5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta um estudo estatístico dos resultados de cerca de quatro mil e oitocentos ensaios de dobragem alternada de fios de aço para pré-esforço, obtidos no âmbito do controlo periódico deste produto ao longo de vinte e dois anos, bem como uma análise da sua conformidade com as exigências que lhes são aplicáveis. Este estudo permitiu constatar a influência de determinados parâmetros, tais como o diâmetro dos fios, a sua classe de resistência, o seu fabrico e a entidade que executou os ensaios; além disso esta influência pode variar ao longo do tempo, eventualmente devido a alterações nos processos de fabrico dos fios e de avaliação da sua qualidade.

Deste modo, entre as principais conclusões deste estudo destaca-se a muito elevada dispersão dos resultados analisados, em qualquer um dos casos estudados. Em termos globais, o coeficiente de variação destes resultados é igual a 28%, podendo atingir valores superiores para determinados diâmetros ou classes de resistência particulares, bem como nos resultados obtidos em determinados anos em particular.

Os valores médios dos resultados obtidos pelos Fabricantes foram quase sempre superiores aos valores médios dos resultados obtidos pelo LNEC; por outro lado, a dispersão dos resultados obtidos pelos Fabricantes foi praticamente sempre superior à dispersão dos resultados obtidos pelo LNEC. Em geral constatou-se que, com raras exceções, os valores característicos referentes ao quantilho de 10% das distribuições de resultados dos ensaios, realizados pelos Fabricantes ou pelo LNEC, respeitam os limites mínimos estabelecidos na Especificação LNEC E 452:2011.

REFERÊNCIAS

- [1] Decreto-Lei nº 28/2007, de 12 de fevereiro.
- [2] Especificação LNEC E 452:2011 “Fios de aço para pré-esforço. Características e ensaios”, 2011.
- [3] Baptista, A.M. - “Materiais metálicos. Arames. Ensaio de dobragem alternada. Projecto de revisão da NP 851 (1971).” Relatório 83/91 NCE, LNEC, 1991, 17 p.