



QIC2016

2º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 24 de novembro de 2016

AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS DE VARÕES PARA BETÃO ARMADO

António Manuel Baptista

Doutorado, LNEC, ambaptista@lneec.pt

Maria João Correia

Doutorada, LNEC, mjmcorreia@lneec.pt

Elsa Vaz Pereira

Doutorada, LNEC, epereira@lneec.pt

João Filipe

Mestre, LNEC, jfilipe@lneec.pt

Resumo

A presente comunicação apresenta um estudo da distribuição estatística dos teores de elementos químicos do aço de varões para betão armado, pertencentes a diferentes classes de resistência, com limites estabelecidos nas especificações LNEC. Com base nos resultados recolhidos ao longo de um largo número de anos de acompanhamento do fabrico destes produtos, estabelecem-se comparações entre as distribuições dos teores dos principais elementos que integram a composição química de aços de classes de resistência e proveniências diferentes, e apresenta-se a sua evolução ao longo do tempo.

O teor do carbono e o valor calculado do carbono equivalente indicados pelos fabricantes dos varões são comparados com os determinados pelo laboratório de referência (LNEC), através de diagramas onde se apresentam as distribuições dos valores da relação entre os resultados obtidos por estas entidades, a partir de amostras de um mesmo varão.

Palavras-chave: Betão armado / Varões de aço / Composição química dos aços / Soldabilidade / Análise estatística

Introdução

A composição química do aço constitui, conjuntamente com o seu processo de fabrico, um dos principais fatores que condicionam as características mecânicas dos produtos de aço. No caso particular dos produtos de aço utilizados para fins estruturais, destaca-se a influência da composição química sobre as respetivas características associadas à sua resistência, ductilidade e soldabilidade.

A fim de avaliar a influência da composição química dos aços na variação das referidas características mecânicas, interessa analisar a dispersão dos teores dos elementos que integram estas ligas de ferro e que mais influenciam essas características. O presente trabalho apresenta um estudo estatístico da distribuição destes teores, para cada uma de quatro classes de resistência diferentes de aços de varões para betão armado.

Os valores destes teores são influenciados pelas técnicas e pelos equipamentos de ensaio utilizados na sua avaliação. Com o objetivo de estimar a incerteza associada à determinação em particular do carbono e do carbono equivalente, é também apresentado um estudo estatístico da relação entre os resultados obtidos a partir de amostras de um mesmo varão, pelo respetivo fabricante e pelo laboratório de referência (LNEC).

Na sequência da análise da informação atrás referida, apresentam-se algumas considerações sobre a influência da distribuição dos teores destes elementos químicos sobre as propriedades dos varões de aço utilizados em estruturas de betão armado em Portugal.

Origem da informação experimental analisada neste estudo

A colocação no mercado ou a importação de produtos em aço destinados a serem utilizados como armaduras para betão armado em Portugal estão condicionadas, para além da sua Classificação pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pela sua prévia Certificação por um organismo (CERTIF) acreditado pela entidade competente no domínio da acreditação, em conformidade com as metodologias do Sistema Português da Qualidade. O LNEC assegura o apoio técnico ao controlo periódico do fabrico destes produtos, na sequência das Ações de Acompanhamento da Certificação realizadas pela CERTIF.

Este controlo periódico envolve a determinação da composição química, relativamente a dez elementos químicos diferentes (C, Mn, S, P, Cr, Ni, Cu, Mo, V, N), das distintas ligas de aço que constituem estes produtos, e o subsequente cálculo do teor de carbono equivalente, com o objetivo de avaliar a sua soldabilidade.

O presente trabalho apresenta um estudo estatístico da distribuição dos teores de Carbono (C), enxofre (S) e fósforo (P) de aços de varões pertencentes a quatro classes de resistência diferentes, bem como dos correspondentes valores do teor de carbono equivalente (C_{eq}). Os valores analisados foram determinados ao longo dos últimos vinte anos, no âmbito do controlo periódico dos varões de aço para betão armado certificados em Portugal, produzidos por 36 fabricantes diferentes.

Apresentação dos resultados obtidos

Os resultados do estudo estatístico realizado são apresentados nas Figuras 1 a 40 e nos Quadros 1 a 4.

As Figuras 1 a 4 apresentam histogramas com as distribuições estatísticas do teor de carbono dos aços das classes A400 NR e A500 NR, obtidos pelos fabricantes dos varões (Figuras 1 e 2) e pelo LNEC (Figuras 3 e 4). As Figuras 5 e 6 apresentam histogramas com as distribuições estatísticas dos valores da relação entre os teores de carbono de cada varão amostrado, determinados pelo fabricante e pelo LNEC (neste caso, sobre uma segunda amostra do mesmo varão).

As Figuras 7 a 12 são análogas às Figuras 1 a 6, e referem-se ao teor de carbono dos aços das classes A400 NR SD e A500 NR SD, de ductilidade especial.

As Figuras 13 a 24, análogas às Figuras 1 a 12, referem-se ao teor de Carbono equivalente dos aços das mesmas quatro classes de resistência: A400 NR, A500 NR, A400 NR SD e A500 NR SD.

As Figuras 25 a 32 são análogas às Figuras 1 a 4 e às Figuras 7 a 10, e referem-se ao teor de enxofre dos aços das mesmas quatro classes de resistência. As Figuras 33 a 40 são análogas às Figuras 25 a 32, e referem-se ao teor de fósforo dos aços das mesmas quatro classes de resistência.

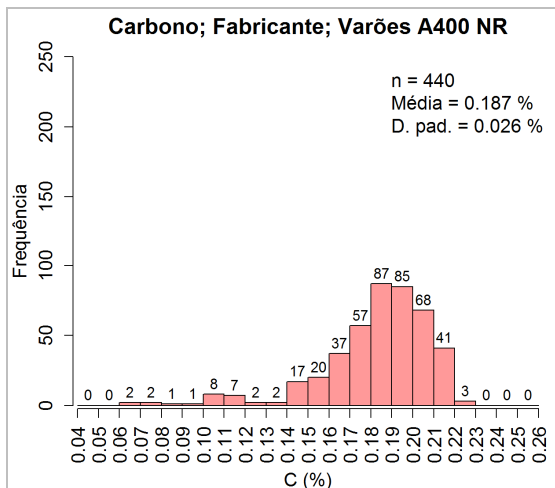


Figura 1: Valores do teor de carbono do aço A400 NR obtidos pelos Fabricantes

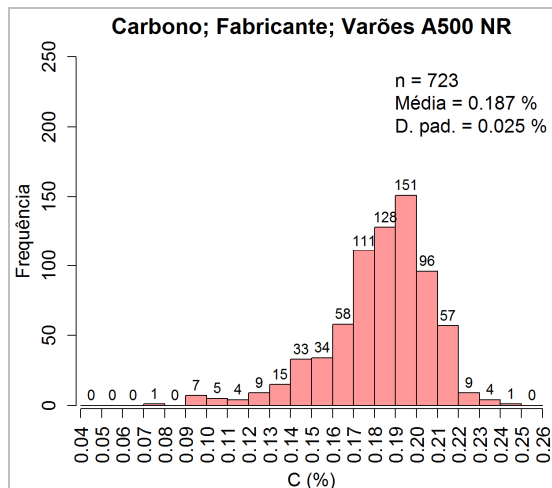


Figura 2: Valores do teor de carbono do aço A500 NR obtidos pelos Fabricantes

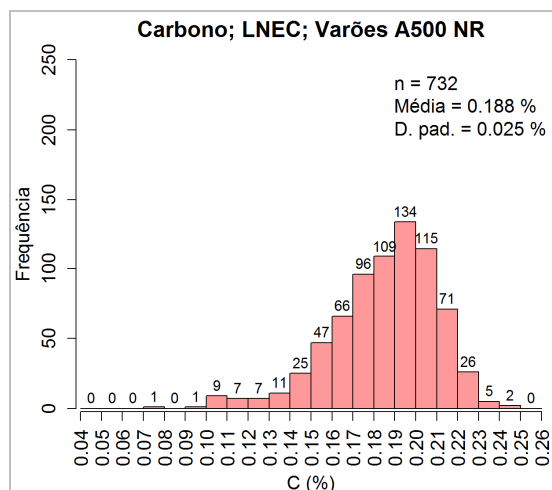
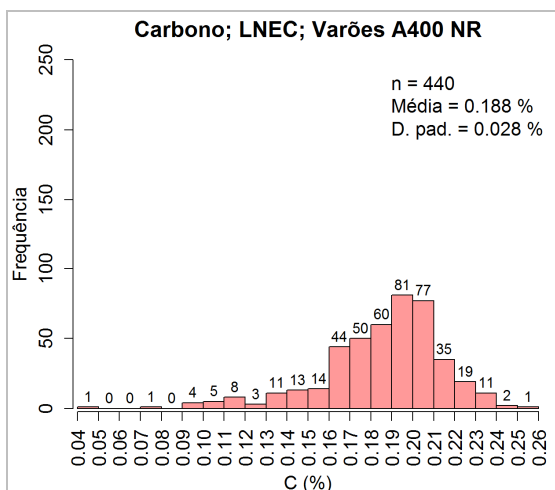


Figura 3: Valores do teor de carbono do aço A400 NR obtidos pelo LNEC

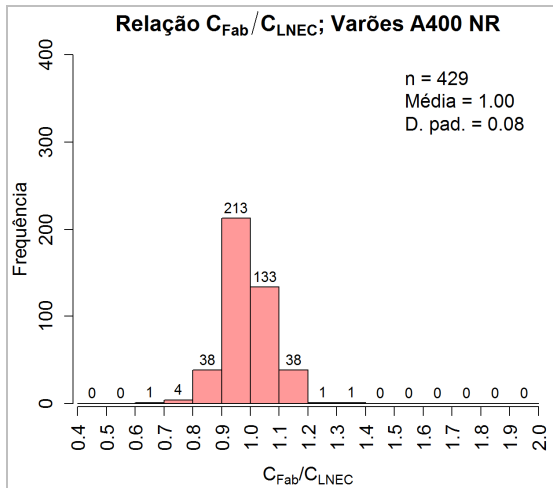


Figura 4: Valores do teor de carbono do aço A500 NR obtidos pelo LNEC

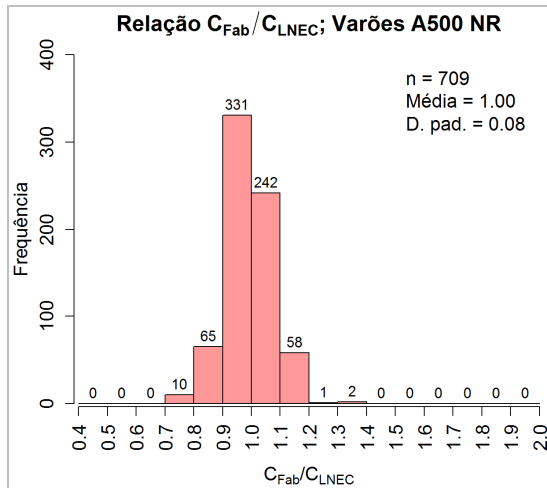


Figura 5: Relação entre teores de carbono do aço A400 NR obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

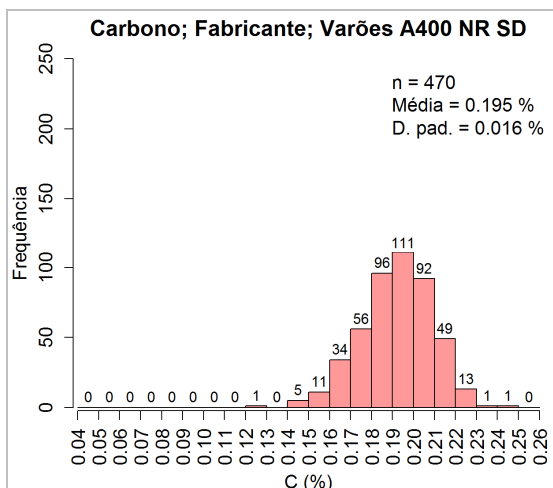


Figura 6: Relação entre teores de carbono do aço A500 NR obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

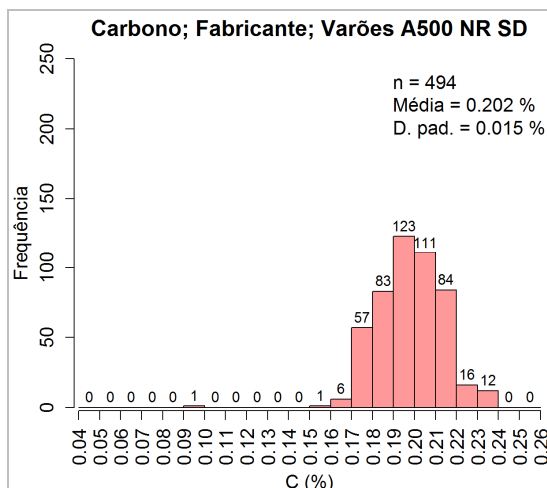


Figura 7: Valores do teor de carbono do aço A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes

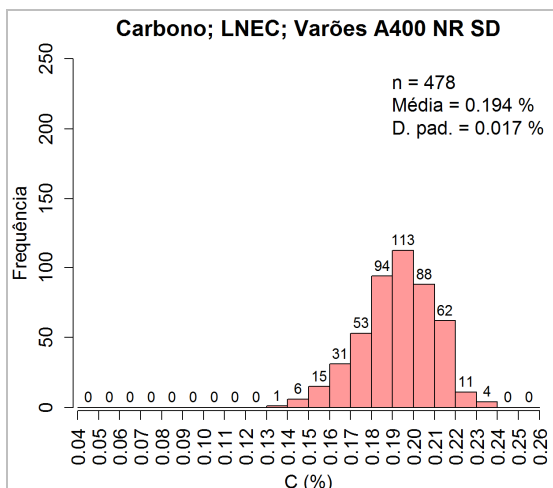


Figura 8: Valores do teor de carbono do aço A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes

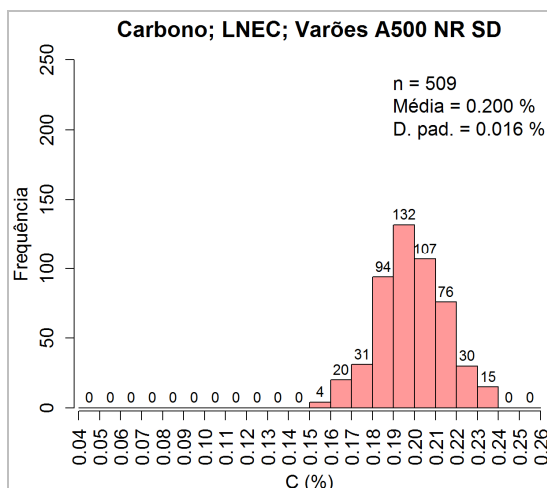


Figura 9: Valores do teor de carbono do aço A400 NR SD obtidos pelo LNEC

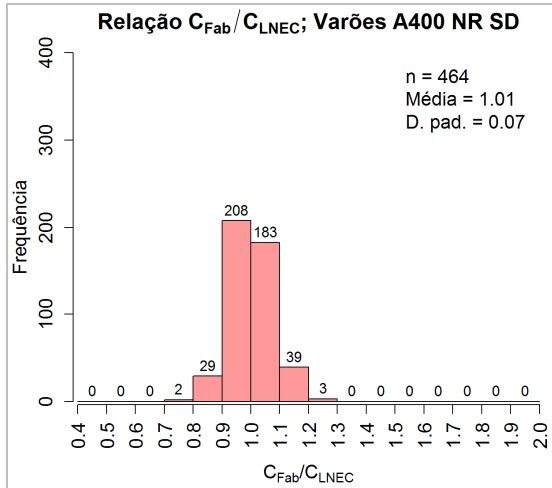


Figura 10: Valores do teor de carbono do aço A500 NR SD obtidos pelo LNEC

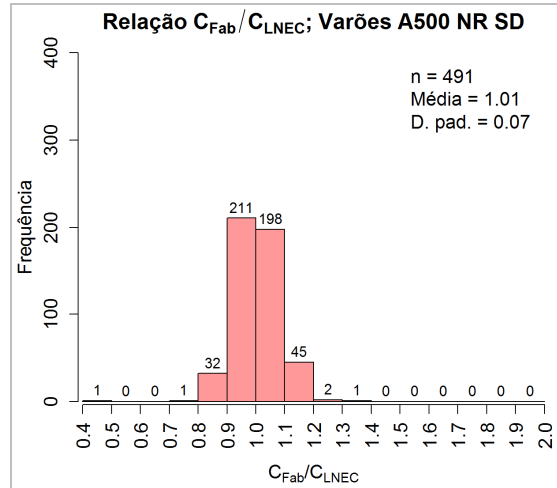


Figura 11: Relação entre teores de carbono do aço A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

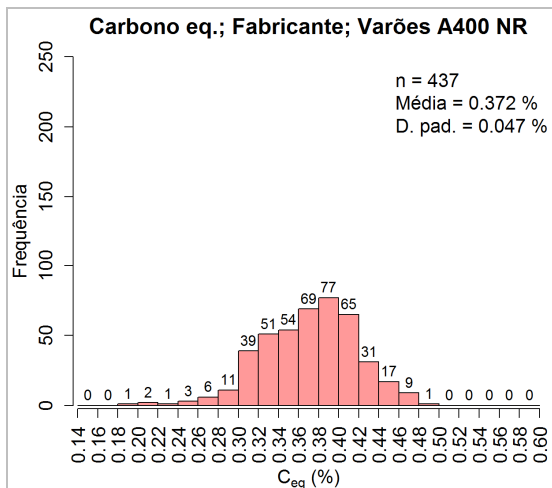


Figura 12: Relação entre teores de carbono do aço A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

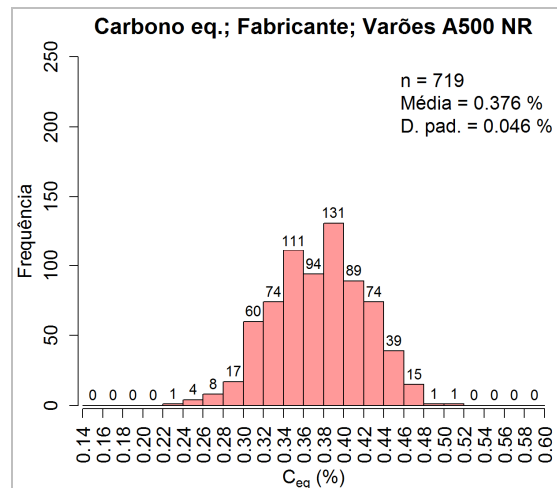


Figura 13: Valores do teor de carbono equivalente do aço A400 NR obtidos pelos Fabricantes

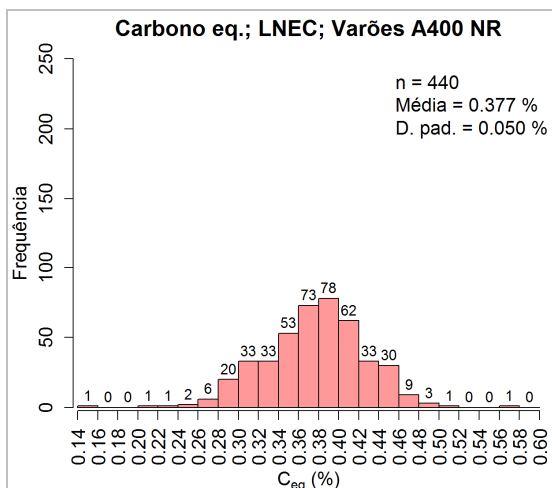


Figura 14: Valores do teor de carbono equivalente do aço A500 NR obtidos pelos Fabricantes

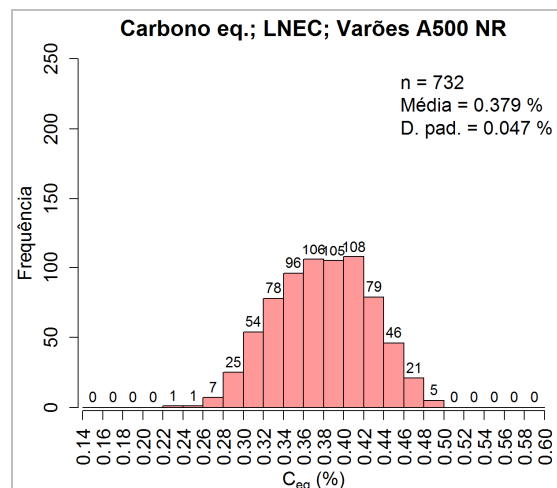


Figura 15: Valores do teor de carbono equivalente do aço A400 NR obtidos pelo LNEC

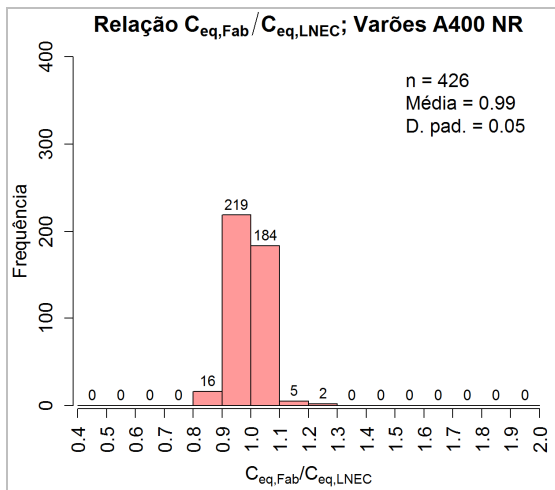


Figura 16: Valores do teor de carbono equivalente do aço A500 NR obtidos pelo LNEC

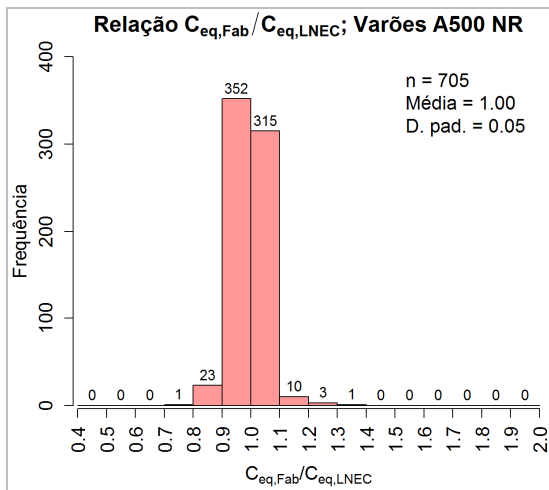


Figura 17: Relação entre carbono equivalente do A400 NR obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

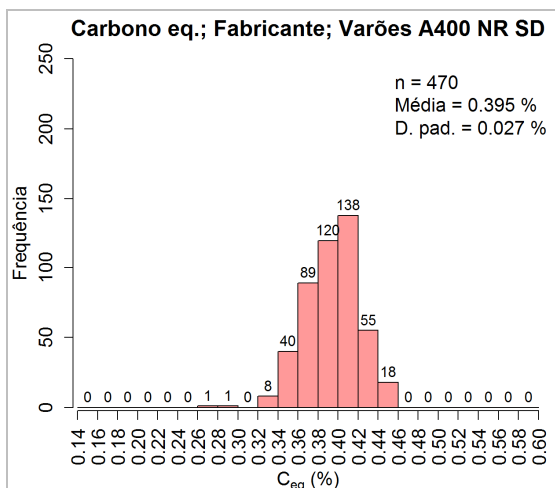


Figura 18: Relação entre carbono equivalente do A500 NR obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

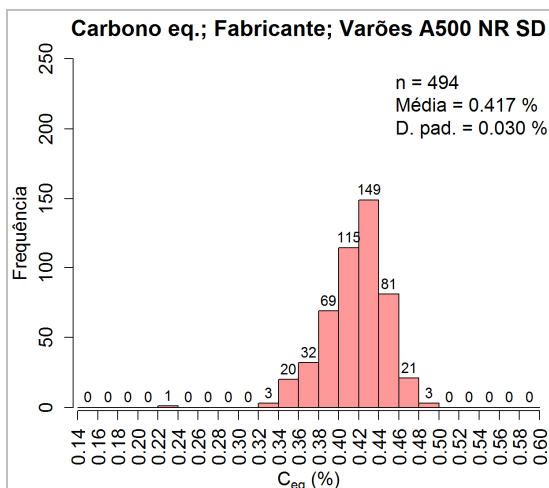


Figura 19: Valores do teor de carbono equivalente do aço A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes

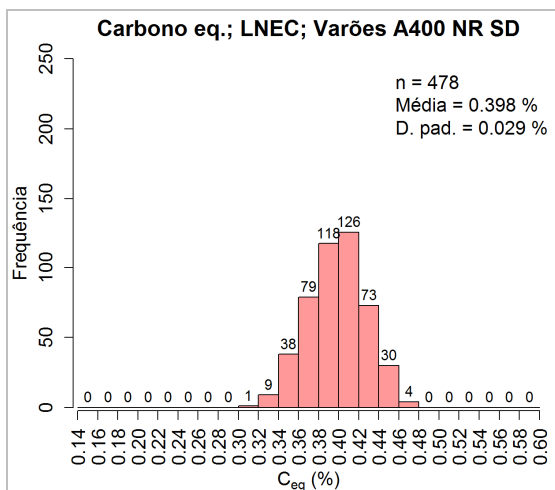


Figura 20: Valores do teor de carbono equivalente do aço A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes

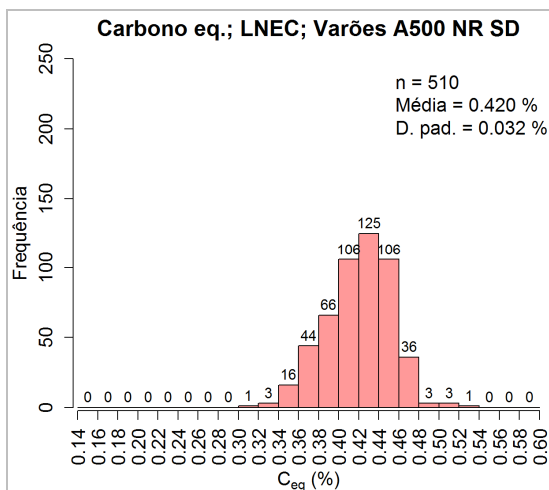


Figura 21: Valores do teor de carbono equivalente do aço A400 NR SD obtidos pelo LNEC

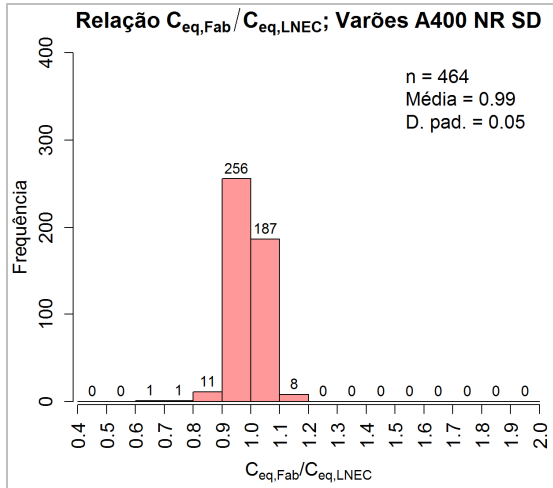


Figura 22: Valores do teor de carbono equivalente do aço A500 NR SD obtidos pelo LNEC

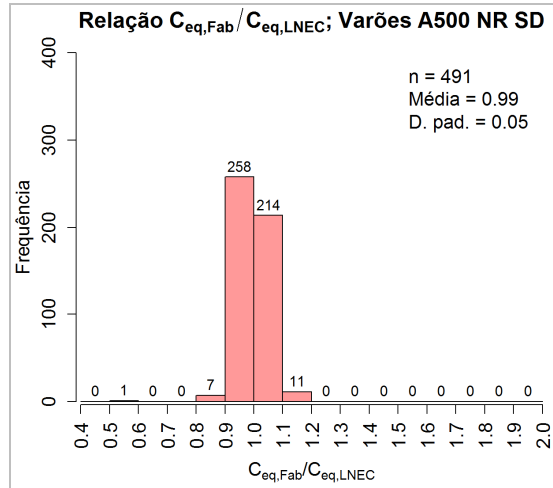


Figura 23: Relação entre carbono equivalente do A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

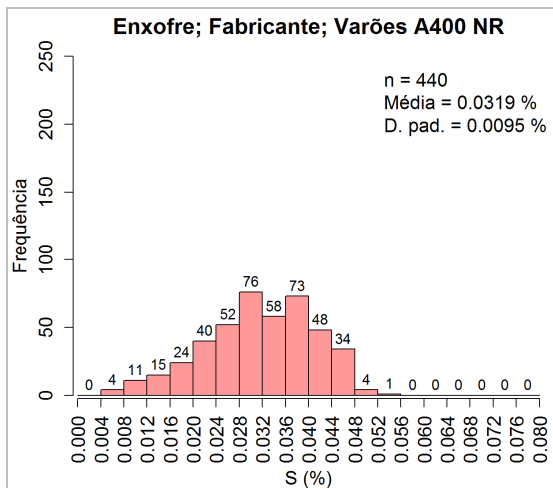


Figura 24: Relação entre carbono equivalente do A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes e pelo LNEC

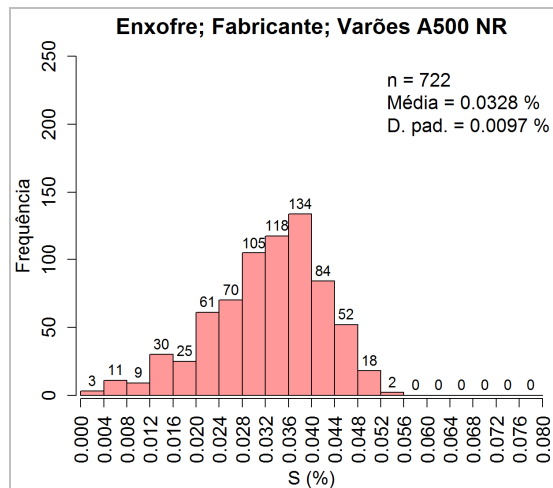


Figura 25: Valores do teor de enxofre do aço A400 NR obtidos pelos Fabricantes

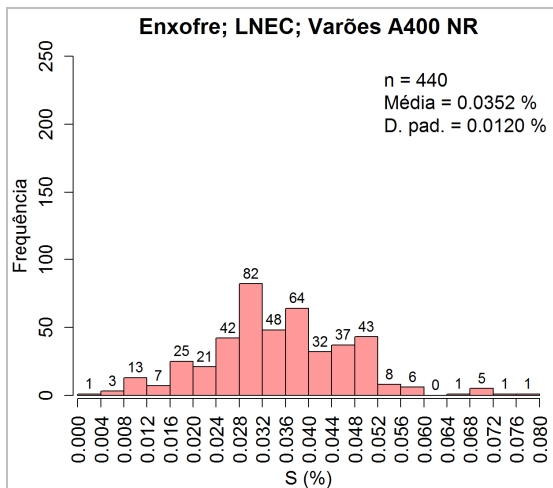


Figura 26: Valores do teor de enxofre do aço A500 NR obtidos pelos Fabricantes

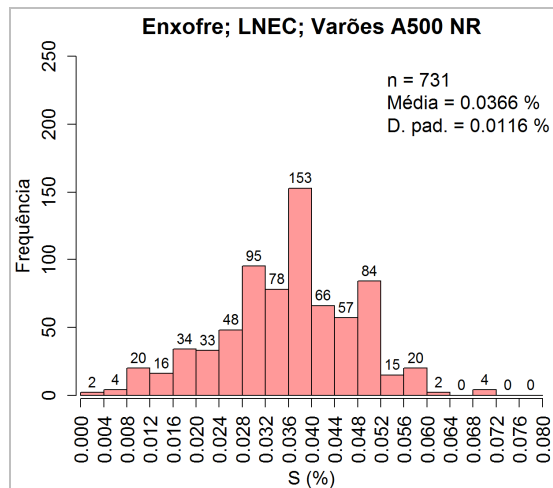


Figura 27: Valores do teor de enxofre do aço A400 NR obtidos pelo LNEC

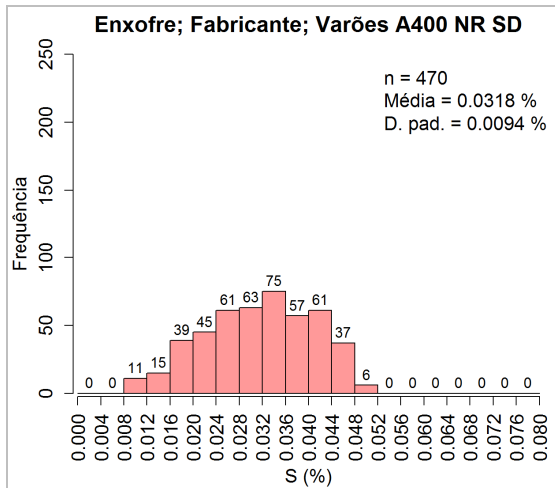


Figura 28: Valores do teor de enxofre do aço A500 NR obtidos pelo LNEC

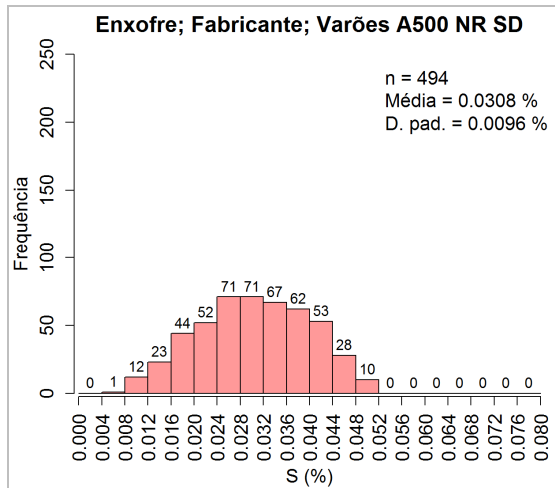


Figura 29: Valores do teor de enxofre do aço A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes

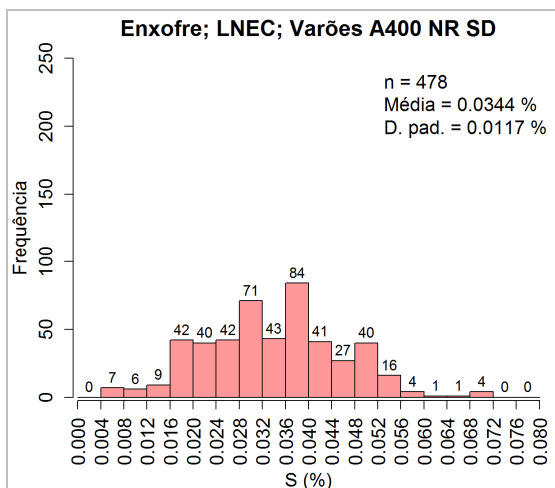


Figura 30: Valores do teor de enxofre do aço A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes

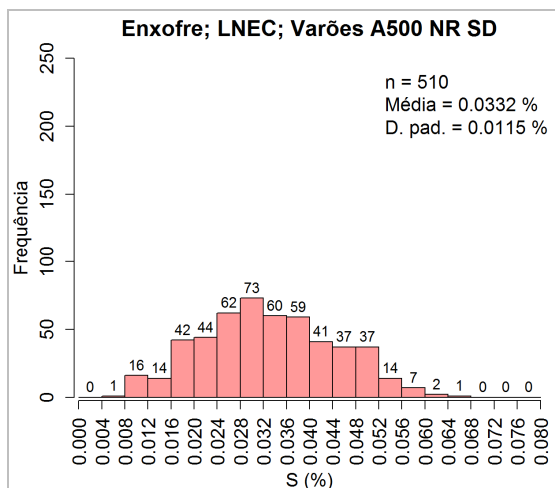


Figura 31: Valores do teor de enxofre do aço A400 NR SD obtidos pelo LNEC

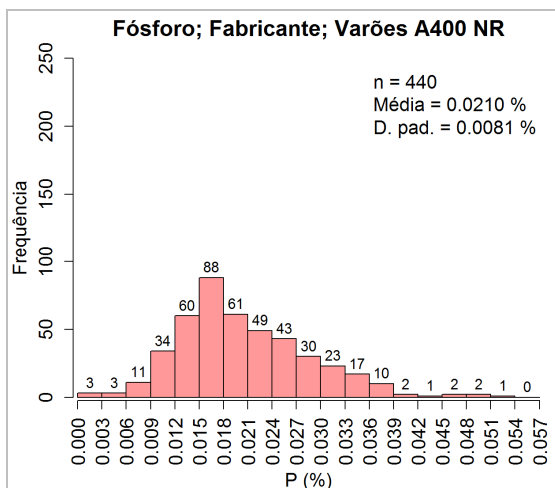


Figura 32: Valores do teor de enxofre do aço A500 NR SD obtidos pelo LNEC

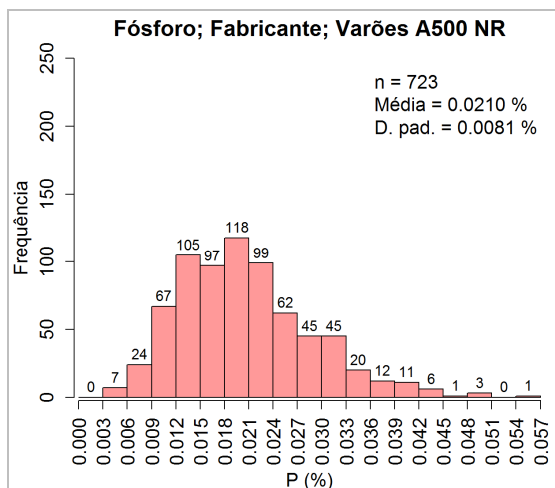
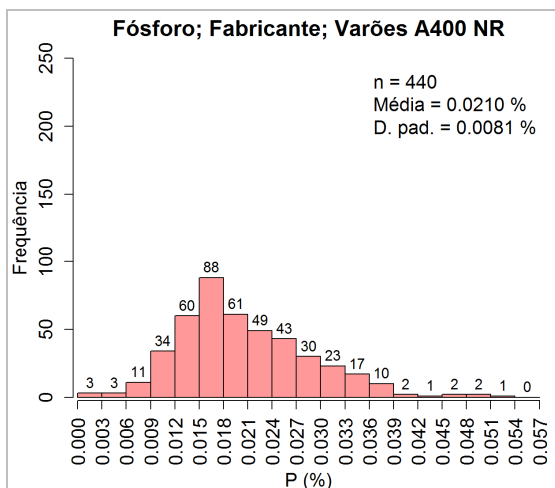
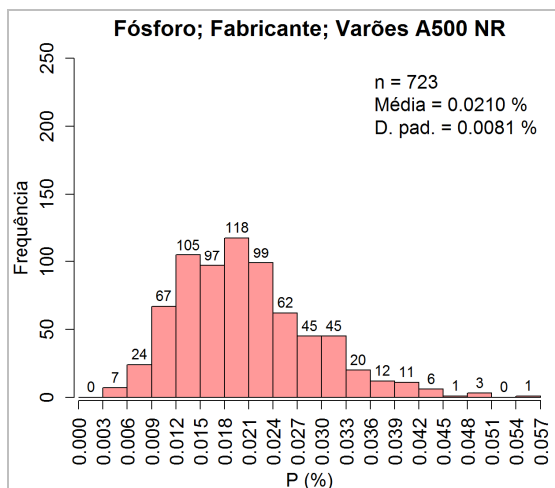


Figura 33: Valores do teor de fósforo do aço A400 NR obtidos pelos Fabricantes

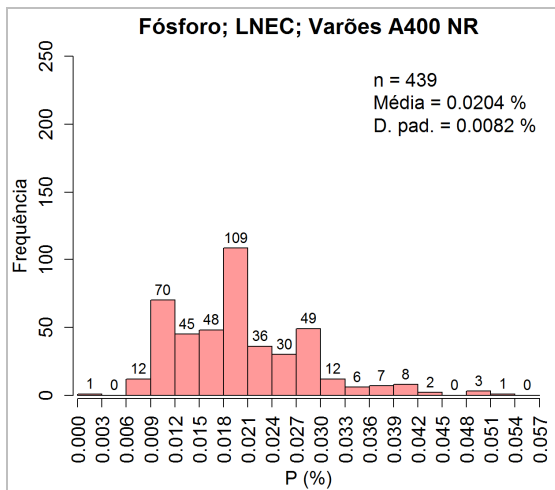


Figura 34: Valores do teor de fósforo do aço A500 NR obtidos pelos Fabricantes

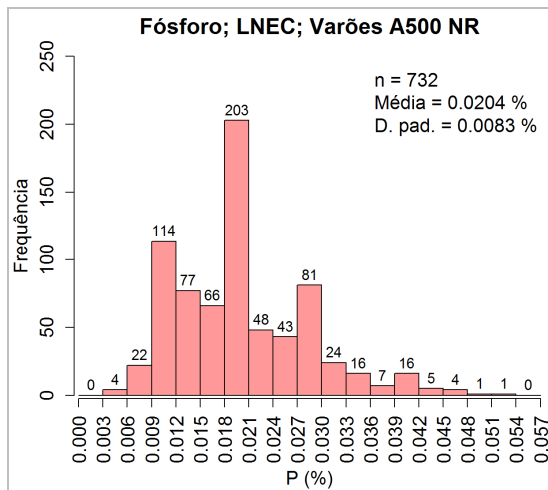


Figura 35: Valores do teor de fósforo do aço A400 NR obtidos pelo LNEC

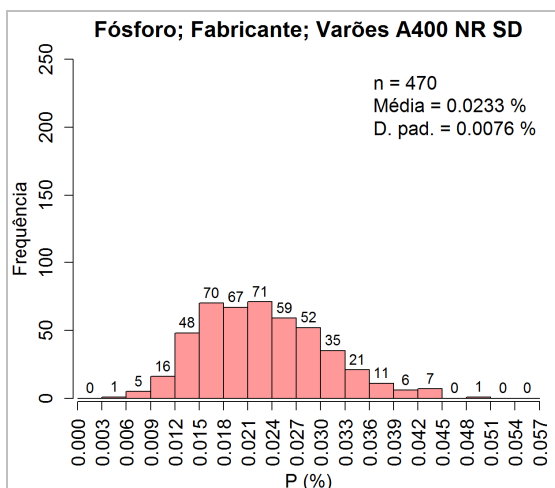


Figura 36: Valores do teor de fósforo do aço A500 NR obtidos pelo LNEC

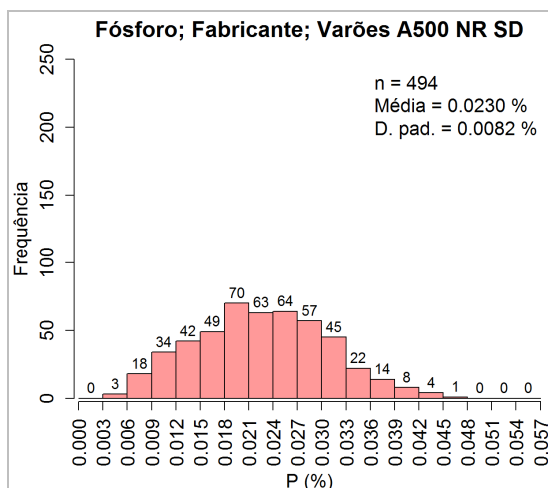


Figura 37: Valores do teor de fósforo do aço A400 NR SD obtidos pelos Fabricantes

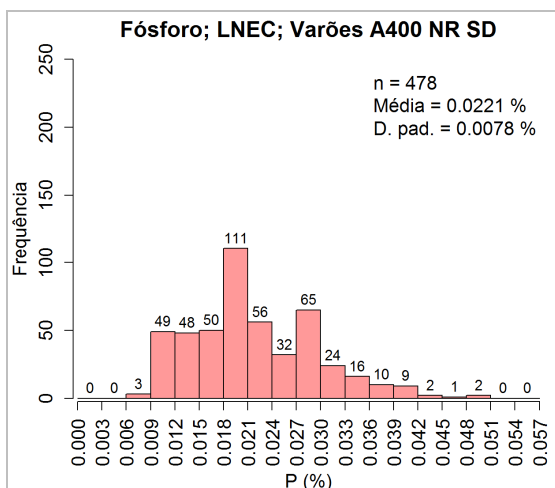


Figura 38: Valores do teor de fósforo do aço A500 NR SD obtidos pelos Fabricantes

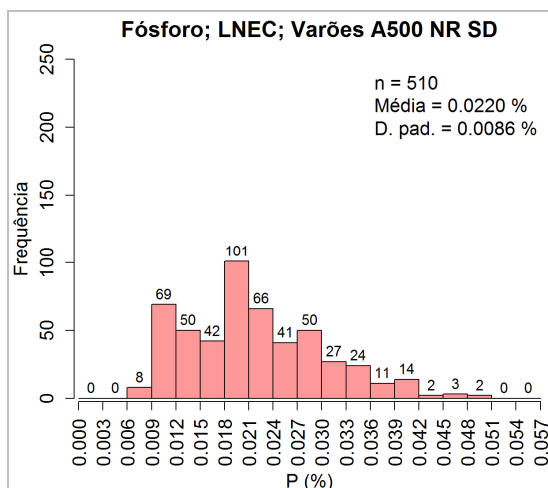


Figura 39: Valores do teor de fósforo do aço A400 NR SD obtidos pelo LNEC

Figura 40: Valores do teor de fósforo do aço A500 NR SD obtidos pelo LNEC

Quadro 1 – Quantidade de valores do teor de carbono, obtidos pelo LNEC, acima do respetivo limite mínimo especificado

Limite	≤ 0,24 %			
Classe	n	Média (%)	D. Pad. (%)	n _{def}
A400 NR	440	0,188	0,028	0,68%
A400 NR SD	478	0,194	0,017	0,00%
A500 NR	732	0,188	0,025	0,27%
A500 NR SD	509	0,200	0,016	0,00%
Total	2159	0,192	0,023	0,23%

Quadro 2 – Quantidade de valores do teor de carbono equivalente, obtidos pelo LNEC, acima do respetivo limite mínimo especificado

Limite	≤ 0,52 %			
Classe	n	Média (%)	D. Pad. (%)	n _{def}
A400 NR	440	0,377	0,050	0,22%
A400 NR SD	478	0,398	0,029	0,00%
A500 NR	732	0,379	0,047	0,00%
A500 NR SD	510	0,420	0,032	0,20%
Total	2160	0,392	0,044	0,093%

Quadro 3 – Quantidade de valores do teor de enxofre, obtidos pelo LNEC, acima do limite mínimo especificado

Limite	≤ 0,055 %			
Classe	n	Média (%)	D. Pad. (%)	n _{def}
A400 NR	440	0,0352	0,0120	3,64%
A400 NR SD	478	0,0344	0,0117	2,30%
A500 NR	731	0,0366	0,0116	3,56%
A500 NR SD	510	0,0332	0,0115	2,55%
Total	2159	0,0350	0,0117	3,06%

Quadro 4 – Quantidade de valores do teor de fósforo, obtidos pelo LNEC, acima do limite mínimo especificado

Limite	≤ 0,055 %			
Classe	n	Média (%)	D. Pad. (%)	n _{def}
A400 NR	439	0,0204	0,0082	0,00%
A400 NR SD	478	0,0221	0,0078	0,00%
A500 NR	732	0,0204	0,0083	0,00%
A500 NR SD	510	0,0220	0,0086	0,00%
Total	2159	0,0211	0,0083	0,00%

O Quadro 1 apresenta, para cada uma das quatro classes de resistência, o número total de resultados analisados, o valor médio do teor em carbono, o respetivo desvio-padrão, e a percentagem de resultados insatisfatórios, que não respeitam o limite máximo de 0,24%, estipulado nas Especificações LNEC aplicáveis a estes varões e também referido neste Quadro 1.

Os Quadros 2 a 4 são análogos ao Quadro 1 e referem-se, respetivamente, ao teor de carbono equivalente, ao teor de enxofre e ao teor de fósforo.

Análise dos resultados obtidos

Valores médios obtidos para as diferentes classes de resistência

Com base nos resultados apresentados nas Figuras 1 a 40 e nos Quadros 1 a 4 é possível tecer as seguintes conclusões.

O valor médio do teor de carbono (C) dos aços é praticamente o mesmo para as classes A400 NR e A500 NR; o mesmo sucede no caso dos valores médios do teor de carbono equivalente (C_{eq}) e do teor de fósforo (P), para as mesmas classes de resistência. Já no caso do teor de enxofre (S), constata-se que o seu valor médio, obtido para a classe A400 NR, é inferior ao obtido para a classe A500 NR, quer pelos fabricantes quer pelo LNEC.

Os valores médios de C, C_{eq} , e P obtidos para os aços das classes A400 NR SD e A500 NR SD são superiores aos correspondentes valores médios obtidos para os aços das classes A400 NR e A500 NR.

Os valores médios de C e de P são semelhantes para as duas classes A400 NR SD e A500 NR SD; o valor médio de C_{eq} referente à classe A500 NR SD é superior ao referente à classe A400 NR SD. O valor médio de S referente à classe A500 NR SD é inferior ao referente à classe A400 NR SD, sendo ambos inferiores aos obtidos para as classes A400 NR e A500 NR. Estas conclusões são aplicáveis aos resultados obtidos quer pelos fabricantes quer pelo LNEC.

Os valores médios de C obtidos pelo LNEC para as quatro classes são semelhantes aos obtidos pelos fabricantes para as mesmas classes. Os valores médios de C_{eq} e de P obtidos pelo LNEC para as quatro classes são ligeiramente superiores aos obtidos pelos fabricantes para as mesmas classes. Os valores médios de S obtidos pelo LNEC para as quatro classes são superiores aos obtidos pelos fabricantes para as mesmas classes.

Desvios-padrão obtidos para as diferentes classes de resistência

Os desvios-padrão das distribuições do teor de carbono (C) e do teor de carbono equivalente (C_{eq}) referentes às classes A400 NR e A500 NR são bastante superiores aos referentes às classes A400 NR SD e A500 NR SD, o que indicia um melhor controlo do fabrico destas últimas. No caso dos teores de enxofre (S) os desvios-padrão são relativamente próximos para as quatro classes de resistência.

Os desvios-padrão das distribuições de C, C_{eq} , e P, correspondentes aos resultados obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC, são bastante semelhantes entre si, para cada um destes elementos e para cada uma das classes de resistência.

Os desvios-padrão das distribuições dos valores de S obtidos pelo LNEC são bastante superiores aos desvios-padrão das distribuições dos valores de S obtidos pelos fabricantes, para cada uma das quatro classes de resistência.

Resultados obtidos pelos fabricantes e pelo LNEC

A relação entre os valores do teor de carbono de cada varão amostrado, determinados pelo fabricante e pelo LNEC, mostra que estes valores são praticamente idênticos, uma vez que o valor médio desta relação é igual a 1,00 no caso dos varões NR e igual a 1,01 no caso dos varões NRSD. O desvio-padrão desta relação é de 0,08 no caso dos varões NR e de 0,07 no caso dos varões NRSD.

O mesmo sucede no caso do teor de carbono equivalente, sendo o valor médio desta relação igual a 0,99 e o seu desvio-padrão de 0,05.

Os Quadros 1 a 4 apresentam ainda, para cada uma das quatro classes de resistência, os limites máximos de C, C_{eq} , S e P estipulados nas Especificações LNEC aplicáveis a cada classe de resistência do aço dos varões. Estes Quadros indicam igualmente a percentagem de resultados insatisfatórios, que não respeitam os referidos limites. Os valores apresentados nestes Quadros evidenciam a boa conformidade dos resultados obtidos pelo LNEC com as exigências, no conjunto dos 2159 ensaios realizados para a determinação dos teores de cada um dos quatro elementos químicos analisados neste trabalho.

Influência da composição química dos aços nas suas propriedades

A composição química influencia as características do aço, sendo consensualmente reconhecido o efeito da adição de diferentes elementos químicos.

Ao C, manganês (Mn) e P é associado o aumento da resistência à tração e da dureza, mas também, por vezes, a diminuição da ductilidade ou da tenacidade. O níquel (Ni) e o Mn favorecem a cristalização de uma dada fase (ferrite), enquanto o alumínio (Al), o titânio (Ti) e o vanádio (V) são frequentemente usados para controlo do crescimento do tamanho de grão, conduzindo a uma maior tensão de cedência e à melhoria da ductilidade. No que se refere à resistência à corrosão, o cobre (Cu), o crómio (Cr), o molibdénio (Mo) e o Ni são considerados benéficos.

Outros elementos têm consequências benéficas ou prejudiciais, no que se refere à soldabilidade do aço. Note-se que estas relações não são simples, acrescendo que geralmente os efeitos produzidos por um dado elemento químico são normalmente influenciados pela presença de outros elementos de liga.

No que se refere à soldabilidade, que constitui uma característica essencial destes aços, não só o teor de alguns elementos de liga com efeitos identificados como prejudiciais é limitado, como também normalmente se estabelece um valor máximo para o carbono equivalente (1).

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

O S e o P são especificamente controlados, para mitigar o risco de diminuição da resistência do aço à fratura frágil e diminuir a vulnerabilidade das soldaduras à fissuração, razões pelas quais estes elementos foram analisados no âmbito do presente estudo.

No aço especificado para os varões, o carbono é o principal elemento químico que se encontra na origem das suas propriedades. Este teor é definido em função das características do material que se pretende produzir, mas também da otimização de todo o processo siderúrgico. Com base neste teor e na definição dos restantes parâmetros de processamento, e em particular do tratamento térmico, determina-se a microestrutura, que será a principal responsável pelas distintas características mecânicas das diferentes classes de aço.

Conclusões

Genericamente, os parâmetros estatísticos das distribuições determinados neste estudo indiciam, um controlo mais afinado dos teores de carbono e de carbono equivalente para os aços de ductilidade especial. Contudo, como seria expectável, não se registam diferenças apreciáveis entre os resultados da análise química dos elementos estudados, para os aços de varões para betão armado pertencentes a diferentes classes de resistência. Este facto evidencia que as classes de resistência e, portanto, as propriedades mecânicas desses aços, são fundamentalmente determinadas pelo tratamento térmico, posterior à laminação do varão, que origina significativas alterações microestruturais no aço.

Ainda de acordo com a análise estatística efetuada, registam-se resultados similares entre as distribuições dos teores de carbono e de carbono equivalente obtidos pelo LNEC e pelos fabricantes.

Referências bibliográficas

ASTM E415-15 - **Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM E1019 – 11 - **Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.