



QIC2016

# 2º ENCONTRO NACIONAL SOBRE QUALIDADE E INOVAÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Lisboa • LNEC • 21 a 24 de novembro de 2016

## RESISTÊNCIA AO CORTE DE REDES ELETROSSOLDADAS DE VARÕES DE AÇO PARA BETÃO ARMADO

**António Manuel Baptista**

*Doutorado, LNEC, ambaptista@lnec.pt*

**João Filipe**

*Mestre, LNEC, jfilipe@lnec.pt*

### Resumo

A presente comunicação apresenta um estudo da distribuição estatística dos resultados da resistência ao corte das soldaduras de redes eletrossoldadas, recolhidos ao longo de um largo número de anos de acompanhamento do fabrico destes produtos. Com base neste estudo, procede-se a uma análise da influência de vários parâmetros, tais como a dimensão das amostras recolhidas, os diâmetros dos varões ou a classe de resistência do aço, de modo a se dispor de uma noção mais precisa sobre esta propriedade das redes eletrossoldadas de varões de aço utilizadas em Portugal.

Finalmente, estabelecem-se comparações entre as distribuições estatísticas da resistência ao corte das soldaduras, referentes a redes eletrossoldadas constituídas por varões de três tipos de aço distintos e com nove diâmetros nominais diferentes, de diversos fabricantes.

*Palavras-chave: Betão armado / Redes eletrossoldadas / Varões de aço / Resistência ao corte das soldaduras / Análise estatística*

## Introdução

As redes eletrossoldadas de varões de aço para betão armado, utilizadas como armaduras ordinárias em betão estrutural, são constituídas por varões dispostos em malha ortogonal, sendo as suas ligações asseguradas através de soldadura automática por resistência elétrica em todos os pontos de cruzamento de varões perpendiculares entre si.

A colocação no mercado ou a importação destas redes para utilização como armaduras em elementos estruturais de betão armado ou pré-esforçado estão condicionadas, em Portugal, para além da sua Classificação prévia 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 resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , nos pontos de cruzamento entre varões perpendiculares. Estes valores são obtidos no âmbito dos ensaios de verificação do produto realizados pelo fabricante das redes eletrossoldadas, e dos ensaios de acompanhamento (controlo externo) realizados pelo LNEC. A experiência do controlo desta característica,  $F_s$ , através da realização de ensaios de corte, tem vindo a revelar uma grande variabilidade dos respetivos resultados; se bem que estes possam atingir valores por vezes bastante superiores aos exigidos, a sua elevada dispersão pode conduzir a valores bastante baixos dos valores característicos referentes às suas distribuições estatísticas.

O presente trabalho apresenta um estudo estatístico da distribuição dos resultados da resistência ao corte das soldaduras de redes eletrossoldadas,  $F_s$ , recolhidos ao longo de um grande número de anos de acompanhamento do fabrico deste produto, obtidos pelo LNEC nos ensaios realizados no âmbito da Certificação de redes eletrossoldadas de varões de aço.

Com base neste estudo, procede-se a uma análise da influência de vários parâmetros, tais como a dimensão das amostras recolhidas, os diâmetros dos varões ou a classe de resistência do aço, de modo a se dispor de uma noção mais precisa sobre a resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , das redes eletrossoldadas de varões de aço utilizadas em Portugal.

## Apresentação dos resultados obtidos

Os resultados do estudo estatístico realizado, sobre resultados da resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , são apresentados nas figuras 1 a 24.

Os histogramas das figuras 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 e 17 mostram os histogramas com as distribuições estatísticas dos valores de  $F_s$  obtidos pelo LNEC para redes compostas por varões com diâmetros de 5,0 mm, 6,0 mm, 6,5 mm, 7,0 mm, 7,5 mm, 8,0 mm, 9,0 mm, 10 mm e 12 mm.

Salienta-se que os resultados apresentados para redes eletrossoldadas constituídas por varões com os diâmetros de 5,0 mm, 6,5 mm, 7,0 mm, 7,5 mm e 9,0 mm, se referem apenas a redes da classe A500 ER. Os resultados concernentes a redes eletrossoldadas constituídas por varões com 6 mm, 8 mm e 10 mm de diâmetro dizem respeito a redes das classes A500 ER, A500 NR e A500 NR SD. Finalmente, os resultados apresentados para redes eletrossoldadas constituídas por varões com 12 mm de diâmetro referem-se a redes das classes A500 ER e A500 NR SD.

As figuras 19, 21 e 23 mostram as curvas de densidade (*Kernel density estimation*) dos valores de  $F_s$ , obtidos pelo LNEC para cada conjunto de redes eletrossoldadas das classes A500 ER, A500 NR e A500 NR SD, para um mesmo diâmetro de varão (6,0 mm, 8,0 mm e 10 mm).

O facto de se considerarem apenas os resultados obtidos para um único diâmetro, na análise da influência da classe de resistência, deve-se ao facto de os limites mínimos de  $F_s$ , estipulados na Especificação LNEC E 458:2011, serem diferentes consoante o diâmetro do varão da rede.

As figuras 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18 apresentam, para cada diâmetro de varões, a percentagem de ocorrências de cada um dos mecanismos que deu lugar à rotura em cada ensaio de corte das soldaduras: rotura da soldadura, rotura do varão tracionado ou rotura por corte do varão transversal. As figuras 20, 22 e 24 são idênticas, e referem-se a cada uma das três classes de resistência.

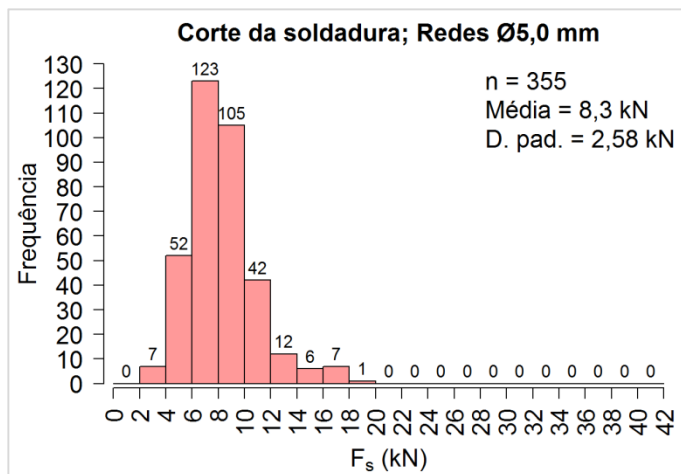


Figura 1: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 5,0 mm de diâmetro

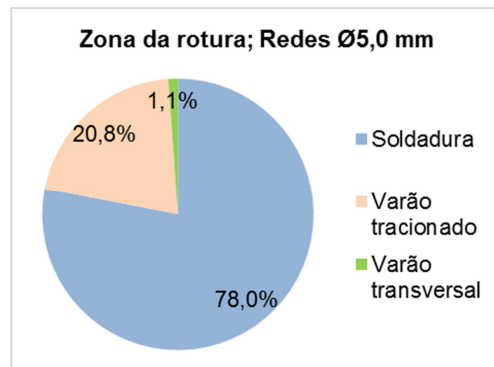


Figura 2: Zona da rotura em redes de varões com 5,0 mm de diâmetro

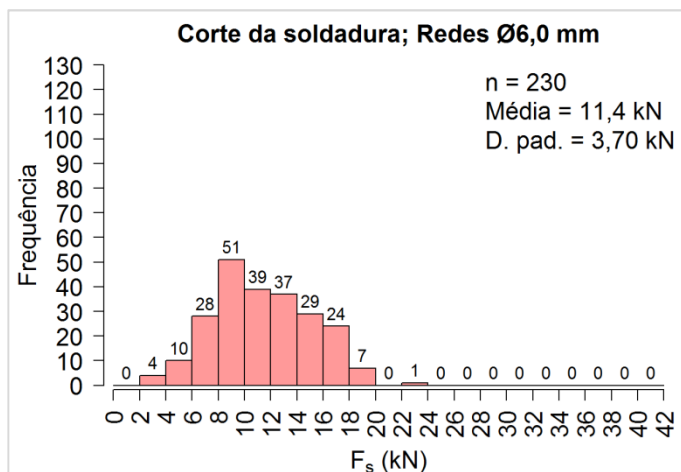


Figura 3: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 6,0 mm de diâmetro

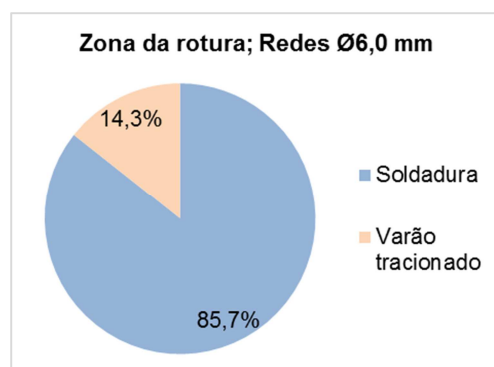


Figura 4: Zona da rotura em redes de varões com 6,0 mm de diâmetro

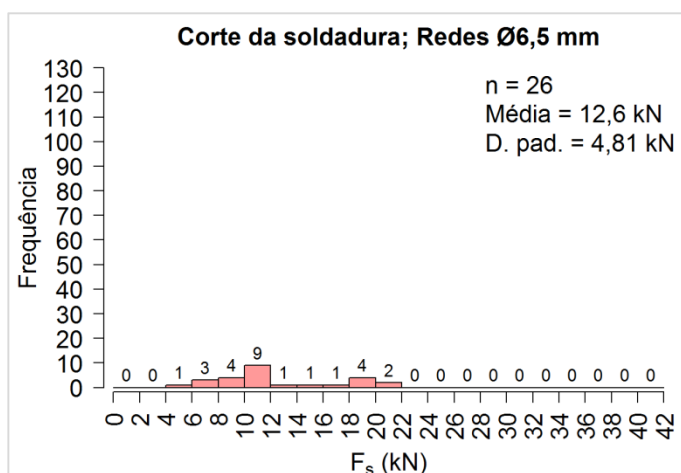


Figura 5: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 6,5 mm de diâmetro

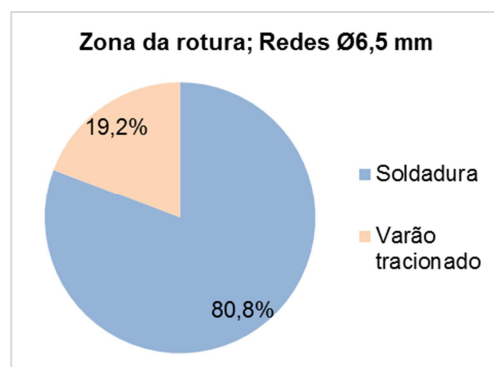


Figura 6: Zona da rotura em redes de varões com 6,5 mm de diâmetro

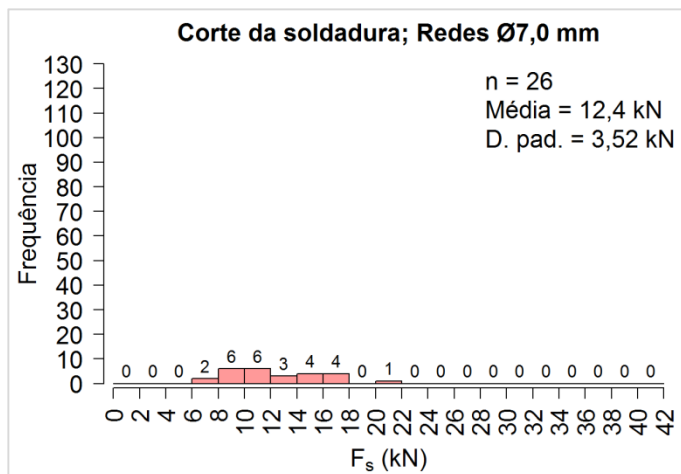


Figura 7: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 7,0 mm de diâmetro

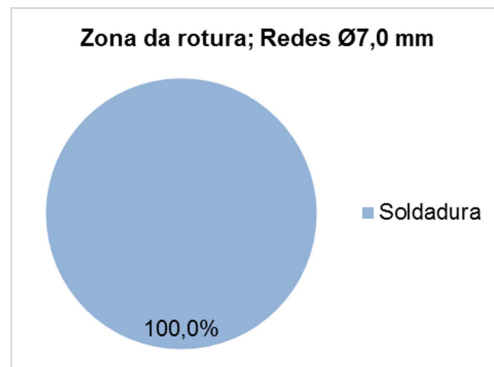


Figura 8: Zona da rotura em redes de varões com 7,0 mm de diâmetro

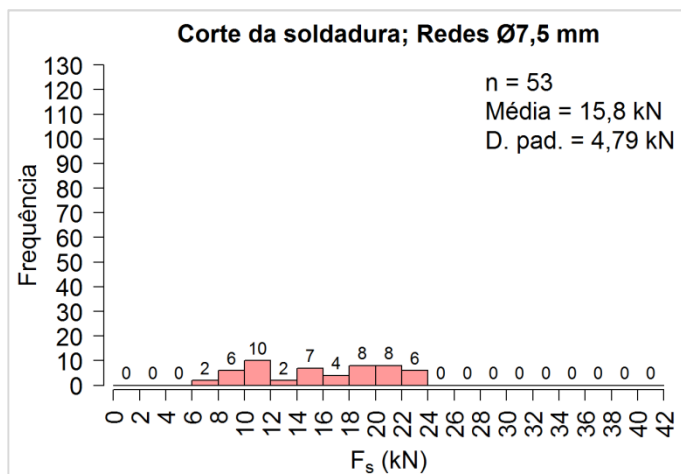


Figura 9: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 7,5 mm de diâmetro

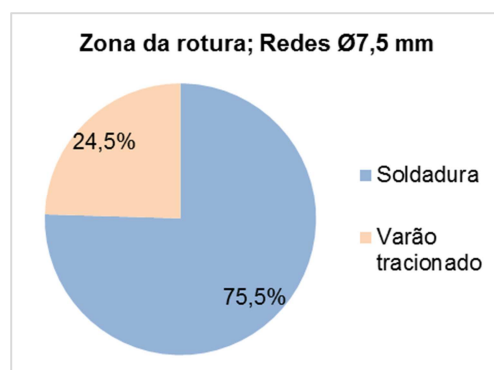


Figura 10: Zona da rotura em redes de varões com 7,5 mm de diâmetro

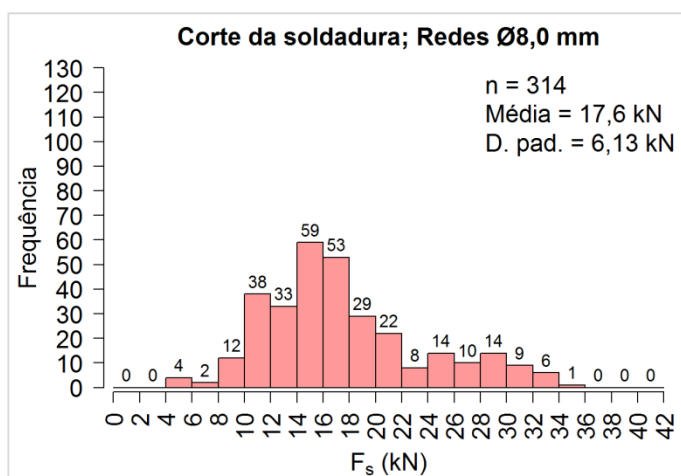


Figura 11: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 8,0 mm de diâmetro

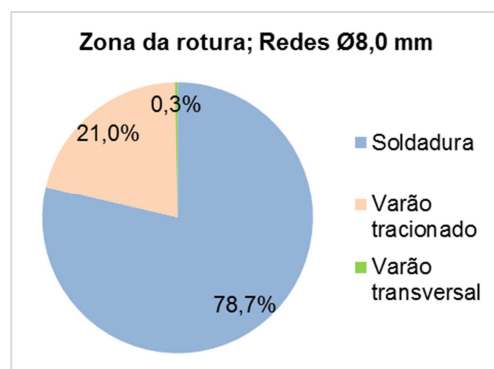


Figura 12: Zona da rotura em redes de varões com 8,0 mm de diâmetro

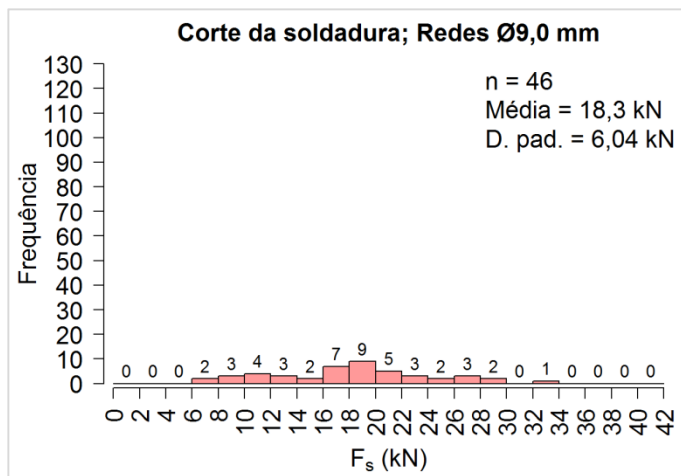


Figura 13: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 9,0 mm de diâmetro

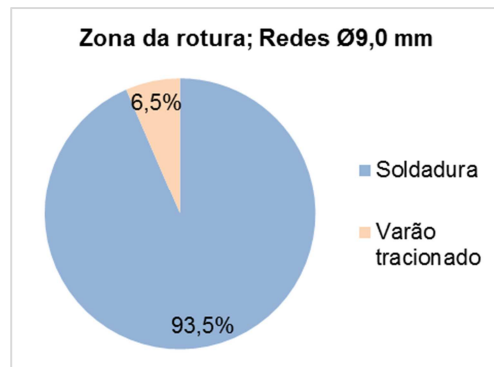


Figura 14: Zona da rotura em redes de varões com 9,0 mm de diâmetro

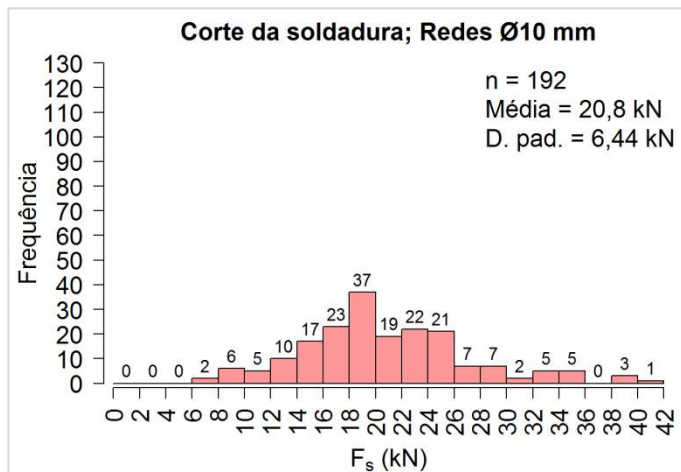


Figura 15: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 10 mm de diâmetro

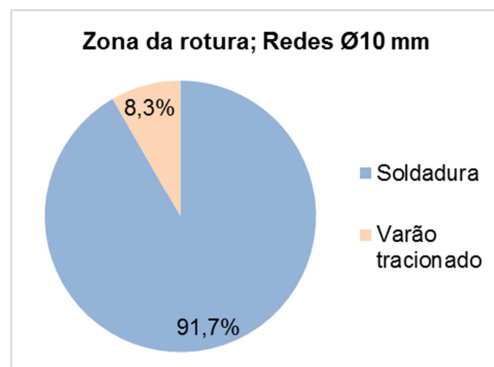


Figura 16: Zona da rotura em redes de varões com 10 mm de diâmetro

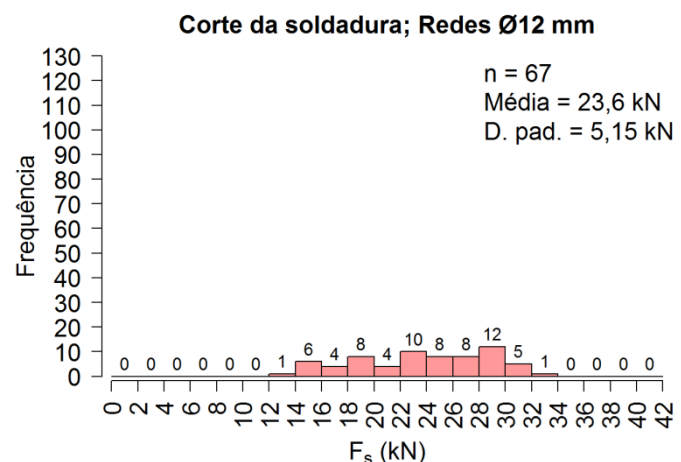


Figura 17: Valores da resistência ao corte das soldaduras de redes constituídas por varões de 12 mm de diâmetro

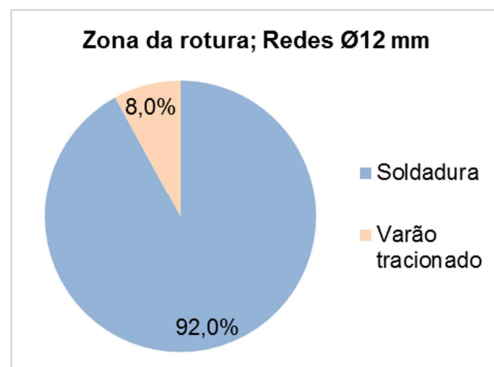


Figura 18: Zona da rotura em redes de varões com 12 mm de diâmetro

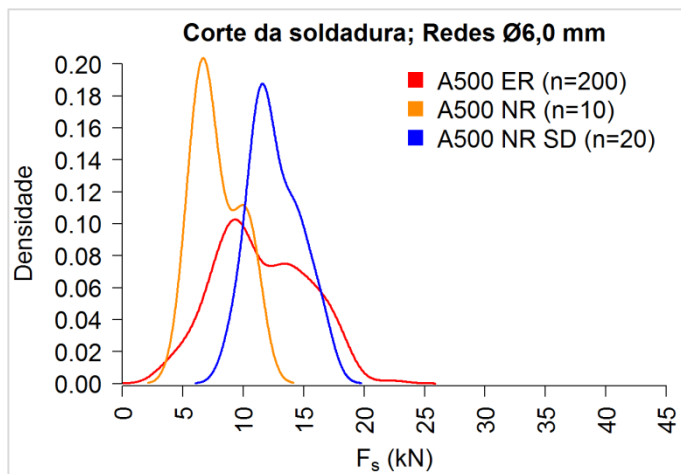


Figura 19: Valores de  $F_s$  para as redes de várias classes, constituídas por varões de 6,0 mm de diâmetro

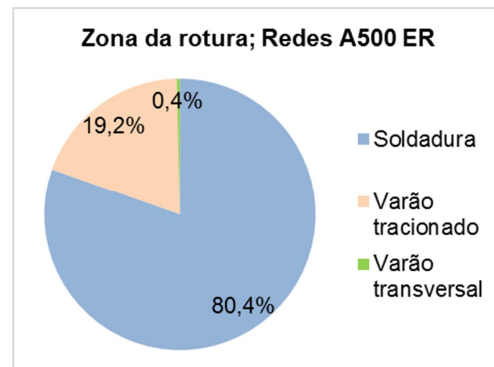


Figura 20: Zona da rotura em redes de varões da classe A500 ER

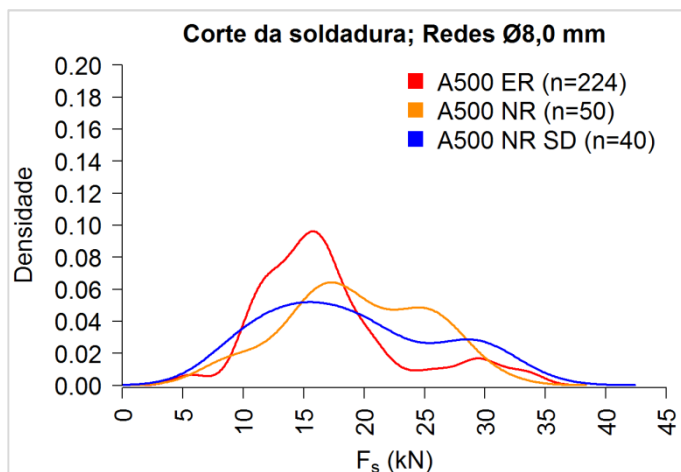


Figura 21: Valores de  $F_s$  para as redes de várias classes, constituídas por varões de 8,0 mm de diâmetro

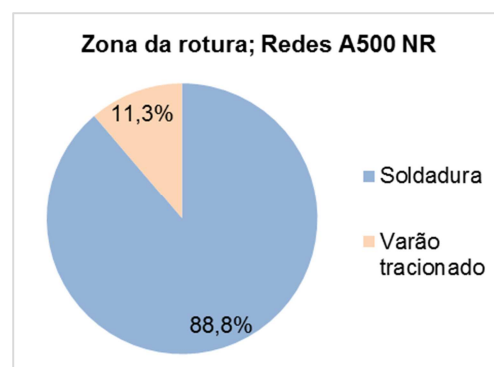


Figura 22: Zona da rotura em redes de varões da classe A500 NR

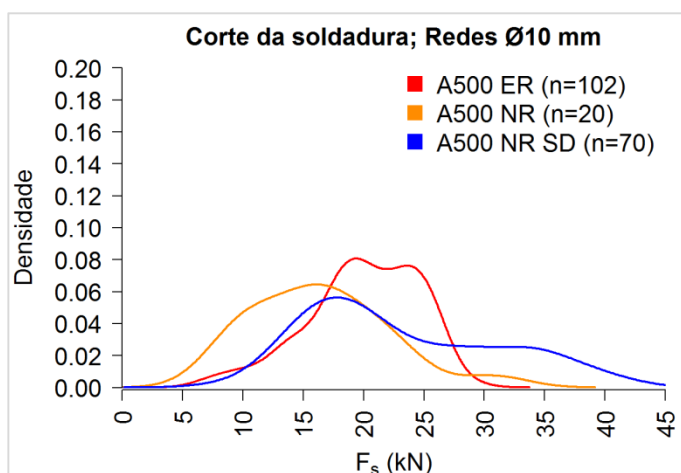


Figura 23: Valores de  $F_s$  para as redes de várias classes, constituídas por varões de 10 mm de diâmetro

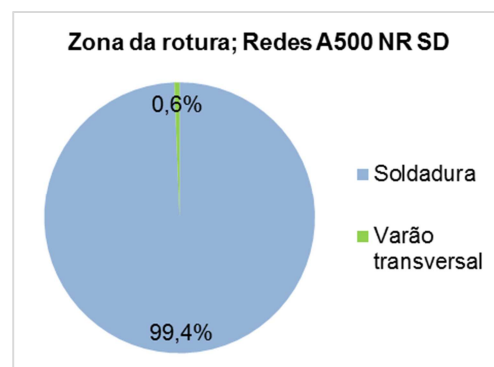


Figura 24: Zona da rotura em redes de varões da classe A500 NR SD

## Análise dos resultados obtidos

### Influência do diâmetro dos varões

Nesta secção analisam-se os resultados das figuras 1 a 18, referentes aos conjuntos de resultados da resistência ao corte das soldaduras  $F_s$  obtidos nos ensaios de redes eletrossoldadas constituídas por varões com um mesmo diâmetro. Os valores característicos mínimos  $F_{s,min}$ , referentes ao quantilho de 5%, da resistência ao corte das soldaduras, estipulados na Especificação LNEC E 458:2011, são indicados no Quadro 1, em função do valor nominal do maior diâmetro  $\emptyset$  dos varões da rede eletrossoldada.

Quadro 1 – Valor característico mínimo, referente ao quantilho de 5%, da resistência ao corte das soldaduras

$\emptyset$ (mm)	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	9,0	10,0	12,0
$F_{s,min}$ (kN)	2,9	4,2	5,0	5,8	6,6	7,5	9,5	11,8	17,0

A figura 1 mostra um histograma onde consta o número de resultados ( $n=355$ ) da resistência  $F_s$  obtidos em ensaios de corte da soldadura realizados pelo LNEC sobre redes eletrossoldadas constituídas por varões com 5,0 mm de diâmetro. Os valores de  $F_s$  encontram-se distribuídos por 9 dos 21 intervalos, com valores compreendidos entre 2 kN e 20 kN. O valor médio destes resultados é de 8,3 kN e o seu desvio-padrão é de 2,58 kN, sendo que a maior concentração de resultados de  $F_s$ , correspondente a 228 dos 355 resultados obtidos, se verifica entre 6 kN e 10 kN.

A figura 3 mostra um histograma, relativo aos resultados da resistência  $F_s$  obtidos em redes eletrossoldadas constituídas por varões com 6,0 mm de diâmetro; a distribuição dos resultados é semelhante à observada na figura 1, embora neste caso o valor médio dos 230 resultados considerados seja superior, com um valor de 11,4 kN. O desvio-padrão destes resultados, com o valor de 3,70 kN, é um pouco superior ao dos resultados apresentados na figura 1. Neste caso, a maior concentração de resultados de  $F_s$ , incluindo 127 dos 230 resultados obtidos para este tipo de redes eletrossoldadas, situa-se entre 8 kN e 14 kN.

Nos restantes histogramas apresentados para as redes constituídas por varões com diâmetros mais elevados (figuras 5, 7, 9, 11, 13, 15 e 17) verifica-se que a distribuição de resultados de  $F_s$  é em geral mais dispersa. No entanto, embora os valores do desvio-padrão sejam, nestes casos, mais elevados que nos histogramas das figuras 1 e 3, os coeficientes de variação destas distribuições não apresentam uma tendência definida; na sua quase totalidade, estes coeficientes de variação encontram-se compreendidos entre 30% e 40%. Constata-se assim que, em todos os casos analisados, os resultados da resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , apresentam dispersões muito elevadas.

Constata-se igualmente que, em geral, os valores médios e os valores característicos inferiores das distribuições de  $F_s$  aumentam com o diâmetro dos varões que constituem a rede. Este facto resulta da necessidade de, nestes casos, a soldadura transmitir maiores esforços entre os varões longitudinais e os varões transversais, a qual se traduz nos valores mais elevados dos limites mínimos  $F_{s,min}$  indicados no Quadro 1, que são proporcionais ao valor nominal da área da secção transversal do varão de maior diâmetro das redes eletrossoldadas.

Salienta-se que alguns destes histogramas foram traçados a partir de um número reduzido de valores, o que pode ter influenciado a distribuição obtida, como por exemplo no caso das figuras 5, 7 e 13, cujos histogramas incluem menos de 50 resultados de  $F_s$ .

A análise das distribuições dos três tipos de mecanismo de rotura observados em redes eletrossoldadas com varões do mesmo diâmetro (figuras 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18) permite constatar que a rotura da junta soldada ocorre maioritariamente (entre 76% e 100% dos casos) por corte da soldadura entre o varão longitudinal e o varão transversal. Quando tal não acontece, a rotura da junta resulta em geral da rotura do varão tracionado. O número de casos em que a rotura da junta se deve à rotura por corte do varão transversal é residual (inferior ou igual a 1% do total).

Verifica-se também que as maiores percentagens (entre 14% e 24%) de roturas das juntas pelo varão tracionado ocorrem nas redes constituídas por varões de menor diâmetro: 5,0 mm, 6,0 mm, 6,5 mm, 7,5 mm e 8,0 mm. No caso das redes constituídas por varões de maior diâmetro (9,0 mm, 10 mm e 12 mm) este tipo de rotura ocorre em apenas 6,5% a 8,3% dos casos.

Este facto evidencia que a resistência da soldadura é sempre o factor com maior influência na resistência ao corte das redes eletrossoldadas, sobretudo nas redes compostas por diâmetros mais elevados. A influência da resistência dos varões tracionados é mais significativa no caso das redes com menores diâmetros; o processo de fabrico das redes eletrossoldadas pode estar na origem destes resultados, nomeadamente devido aos efeitos da zona dos varões termicamente afetada pela soldadura que, em termos relativos, será maior nos varões de menor diâmetro.

### **Análise dos resultados por classe de resistência do aço dos varões**

Nesta secção são discutidos os resultados apresentados nas figuras 19 a 24, relativos a ensaios de corte das soldaduras realizados pelo LNEC em redes eletrossoldadas compostas por varões de aço da mesma classe de resistência (A500 ER, A500 NR ou A500 NR SD). Os resultados apresentados em cada uma das figuras 19, 21 e 23 referem-se a um único diâmetro de varão, pois os limites mínimos estipulados na Especificação LNEC E 458:2011 para a resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , variam conforme o diâmetro do varão tracionado (ver Quadro 1).

Na figura 19 são apresentadas as curvas de densidade (*Kernel density estimation*) dos valores de  $F_s$  referentes a redes constituídas por varões com 6,0 mm de diâmetro, para as três classes de resistência atrás indicadas. É possível verificar que as três distribuições de resultados são semelhantes, embora o valor médio de cada uma delas seja diferente do das restantes.

A curva com o valor médio mais baixo diz respeito às redes de varões de aço da classe A500 NR, enquanto que a curva com o valor médio mais elevado diz respeito às redes de varões de aço da classe A500 NR SD. Estas duas curvas foram traçadas com base num número reduzido de resultados de  $F_s$  (apenas 10 resultados no caso das redes A500 NR e 20 resultados no caso das redes A500 NR SD); no entanto, a dispersão destes resultados é relativamente baixa.

A curva de densidade relativa às redes constituídas por varões de aço da classe A500 ER inclui 200 resultados da resistência  $F_s$ , e apresenta uma dispersão muito mais elevada que as outras duas curvas apresentadas na mesma figura.

As curvas de densidade apresentadas nas figuras 21 e 23, para redes constituídas por varões com 8,0 mm e 10 mm, respetivamente, traduzem uma distribuição de resultados muito diferente das apresentadas na figura 19, para redes compostas por varões com 6,0 mm de diâmetro.

A dispersão de resultados de  $F_s$  que se verifica nas figuras 21 e 23 é muito maior do que na figura 19, não sendo óbvia a influência da classe de resistência do aço dos varões nos resultados da resistência ao corte da rede eletrossoldada,  $F_s$ .

A análise das distribuições dos três tipos de mecanismo de rotura observados em redes eletrossoldadas com varões de aço de cada uma das três classes de resistência (figuras 20, 22 e 24), incluindo todos os nove diâmetros ensaiados (indicados nas figuras 1 a 18), indica que a rotura das juntas ocorre predominantemente (entre 80% e 99% dos casos) pela soldadura entre os varões longitudinais e transversais da rede. Quando tal não acontece, a rotura ocorre no varão tracionado; uma vez mais, o número de casos em que a rotura da junta se deve à rotura por corte do varão transversal é residual (inferior a 1% do total).

Estas figuras 20, 22 e 24 mostram ainda que a ocorrência de roturas pelo varão tracionado é maior nas redes da classe A500 ER (19,2%) do que nas redes da classe A500 NR (11,3%) e nas redes da classe A500 NR SD (0%). Supõe-se que esta diferença poderá resultar do processo de fabrico das redes, sendo o aço endurecido a frio (A500 ER) mais afetado pelos efeitos térmicos na vizinhança da soldadura que os aços laminados a quente (A500 NR e A500 NR SD).



Além disso, o facto de os resultados obtidos em redes da classe A500 ER corresponderem maioritariamente a redes constituídas por varões com pequenos diâmetros pode ter influenciado o valor mais elevado da percentagem de roturas pelo varão tracionado, uma vez que, como se constatou anteriormente, a resistência dos varões com menores diâmetros é mais afetada pelos processos de soldadura.

## Conclusões

O presente artigo apresenta um estudo estatístico da distribuição dos resultados de ensaios de resistência ao corte das soldaduras de redes eletrossoldadas constituídas por varões de aço das classes de resistência A500 ER, A500 NR e A500 NR SD, com 9 diâmetros diferentes (5,0 mm, 6,0 mm, 6,5 mm, 7,0 mm, 7,5 mm, 8,0 mm, 9,0 mm, 10 mm e 12 mm). Estes resultados foram obtidos pelo LNEC ao longo de um largo número de anos de acompanhamento do fabrico deste produto, nos ensaios realizados no âmbito da Certificação de redes eletrossoldadas de varões de aço.

Com base neste estudo conclui-se, sobretudo, que a dispersão dos resultados da resistência ao corte das soldaduras,  $F_s$ , é, em geral, muito elevada. Este facto tem consequências ao nível da avaliação da conformidade das redes eletrossoldadas com as exigências estipuladas nas Especificações LNEC aplicáveis. Tendo em conta a reduzida dimensão das amostras controladas destes produtos, a referida dispersão implica uma redução muito acentuada do valor característico de  $F_s$  avaliado com base nos resultados relativos a cada amostra e, conseqüentemente, um risco acrescido de rejeição de lotes conformes, apesar de os valores individuais de  $F_s$  e de o correspondente valor médio poderem respeitar os limites estabelecidos nas Especificações LNEC.

A resolução deste problema poderá passar pelo aumento da dimensão das amostras controladas, diminuindo-se deste modo a penalização na estimativa do valor característico de  $F_s$  e, conseqüentemente, o risco de rejeição do lote com base nos valores obtidos para esta propriedade.

Constatou-se também que os valores médios de  $F_s$  aumentam com o diâmetro dos varões das redes, o que era expectável pois os limites mínimos estipulados na Especificação LNEC E 458:2011 para esta resistência aumentam com o diâmetro do varão da rede que é tracionado (ver Quadro 1).

Verificou-se ainda que a rotura das juntas soldadas ocorre predominantemente pela soldadura entre os varões longitudinais e transversais da rede. Quando tal não acontece, a rotura ocorre geralmente no varão tracionado.

A maior ocorrência de roturas pelo varão tracionado verifica-se em redes constituídas por varões de menores diâmetros e, em particular, em redes constituídas por varões de aço da classe A500 ER. Supõe-se que esta diferença resulta do processo de fabrico das redes, sendo os seus efeitos na zona termicamente afetada pela soldadura mais significativos nos varões de menor diâmetro; além disso, o aço endurecido a frio (A500 ER) será mais afetado por estes efeitos térmicos que os aços laminados a quente (A500 NR e A500 NR SD).

## Referências bibliográficas

- E 458:2011 – **Redes eletrossoldadas para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 456:2011 – **Varões de aço A500 ER para armaduras de betão armado. Campo de aplicação, características, ensaios e marcação.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 450:2010 – **Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- E 460:2010 – **Varões de aço A500 NR SD de ductilidade especial para armaduras de betão armado. Características, ensaios e marcação.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- NP EN ISO 15630-2:2012 – **Aços para armaduras de betão armado e pré-esforçado; Métodos de ensaio; Parte 2: Redes electrossoldadas.** Instituto Português da Qualidade (IPQ).