



## EFEITO DE SUCESSIVAS REPARAÇÕES POR SOLDADURA

C. VEIGA<sup>1</sup>, A. LOUREIRO<sup>2</sup>, J. PINA<sup>3</sup>, A. C. BATISTA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Inst. Sup. de Eng.<sup>a</sup> de Coimbra  
Q.<sup>ta</sup> da Nora, 3030 Coimbra, Portugal

<sup>2</sup> Dep. Eng.<sup>a</sup> Mec.  
Pólo II, Pinhal de Marrocos, 3030 Coimbra, Portugal

<sup>3</sup> Dep. Física, FCTUC  
Lg. D. Dinis, 3000 Coimbra, Portugal

*(Recibido 5 de abril de 2004, para publicación 24 de octubre de 2004)*

**Resumo** – O objectivo deste trabalho é a análise da evolução da microestrutura, das propriedades mecânicas e das tensões residuais em juntas soldadas de um aço carbono-manganês, quando submetidas a duas reparações sucessivas por soldadura. Para isso foram utilizadas chapas de dimensões 400x180x11mm, as quais foram montadas na forma de junta de bordos direitos, submetidas a um tratamento térmico de alívio de tensões residuais e seguidamente soldadas topo a topo pelo processo MAG robotizado, usando duas camadas de soldadura. Após a deposição das camadas de soldadura foram realizadas duas reparações sucessivas, também através do processo MAG robotizado. As tensões residuais foram medidas após a deposição das camadas de soldadura, bem como após cada reparação. As medições foram realizadas à superfície em linhas transversais ao cordão e ao longo do seu eixo. Finalmente foram preparados provetes a partir do material da junta, nos quais foram realizados exames metalográficos, medição de dureza e ensaios de tracção. Verificou-se que as reparações induziram alterações ao nível da microestrutura, das propriedades mecânicas e do campo de tensões residuais preexistentes na zona reparada. Ocorreram aumentos de estruturas refinadas tanto na zona afectada pelo calor como, e sobretudo, na zona fundida. As reparações provocaram uma ligeira diminuição da dureza e do limite elástico da zona fundida. Provocaram ainda, essencialmente na zona reparada, um aumento das tensões residuais longitudinais e transversais. Porém, as tensões residuais não atingiram o limite elástico do material na zona onde ocorrem.

### 1. INTRODUÇÃO

As reparações de componentes, soldados ou não, sujeitos a condições de serviço severas ou a períodos longos de serviço são comuns. As reparações por soldadura constituem um método conveniente e económico de remover as falhas, e presentemente são usadas numa grande variedade de aplicações, tais como ferramentas, moldes, pontes, tanques criogénicos, componentes de motores a jacto, pás de turbinas, etc. [1]. Resultados de investigação no domínio das reparações por soldadura mostram, por exemplo, que as reparações de componentes tubulares podem ser realizadas com sucesso [1-3] e que a vida dos componentes reparados pode ser prolongada por décadas [2]. No entanto, as reparações por soldadura produzem normalmente alterações marcantes na estrutura e propriedades mecânicas do material, que podem prejudicar de forma significativa o comportamento em serviço dos equipamentos [4-6]. Além disso, as reparações por soldadura originam alterações do campo de tensões residuais na vizinhança da zona reparada, as quais também afectam a vida restante dos equipamentos [7]. Trabalhos de inspecção mostram que cerca de 40% das reparações realizadas em blocos de turbinas resultam em subsequente fissuração [8].

A reparação por soldadura consiste basicamente em remover o material na zona defeituosa, de modo a eliminar o defeito, e depositar em seguida uma ou várias camadas de soldadura no entalhe obtido. No entanto, diversos procedimentos podem ser adoptados no processo de reparação por soldadura, residindo as diferenças entre eles na geometria do entalhe de reparação, nos parâmetros e nos procedimentos de soldadura. Procedimentos diferentes originam alterações diferentes nas zonas reparadas.

O objectivo deste trabalho é justamente caracterizar a evolução da microestrutura, das propriedades

Tabela 1. Composição química nominal do material de base utilizado na soldadura.

|             |             |             |             |             |                             |                    |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|--------------------|
| %C          | %Si<br>max. | %Mn         | %P<br>max.  | %S<br>max.  | %Al <sub>ges.</sub><br>min. | %Cr<br>max.        |
| 0,08 a 0,20 | 0,40        | 0,90 a 1,50 | 0,030       | 0,025       | 0,020                       | 0,30               |
| %Cu<br>max. | %Mo<br>max. | %Nb<br>max. | %Ni<br>max. | %Ti<br>max. | %V<br>max.                  | % Cr+Mo+Ni<br>max. |
| 0,30        | 0,08        | 0,010       | 0,30        | 0,03        | 0,02                        | 0,70               |

Tabela 2. Propriedades mecânicas do material de base utilizado na soldadura.

|                | Tensão limite elástico<br>$\sigma_c$ [MPa] | Resistência à tracção<br>$\sigma_{max}$ [MPa] | Alongamento após rotura [%] $\epsilon_R$ | Energia de Impacto, $K_v$ |                 |
|----------------|--|---|--|---------------------------|-----------------|
|                |  |   |  | Temperatura de teste [°C] | Valor médio [J] |
| <b>Nominal</b> | 295  | 460 a 580                                     | 22                                       | 0                         | 27              |
| <b>Ensaio</b>  | 312,2                                      | 556,7   | 20,5                                     | -                         | -               |

mecânicas e do campo de tensões residuais em juntas soldadas num aço C-Mn, quando submetidas a duas reparações sucessivas, por um processo de soldadura por arco eléctrico.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As placas de ensaio foram chapas de aço C-Mn com a designação P295GH, segundo a norma EN 10028-2 1992, cuja composição química e propriedades mecânicas estão indicadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

As placas possuíam dimensões 400x180x11 mm, e foram montadas formando junta de topo de bordos direitos com folga de 2 mm. A fixação das placas a soldar foi realizada com auxílio de chapas auxiliares e pontos de soldadura.

As placas assim obtidas foram seguidamente sujeitas a um tratamento térmico de relaxação de tensões residuais. O ciclo térmico associado a este tratamento caracterizou-se por uma velocidade de aquecimento de 4°C/min, um tempo de permanência a 580°C de 35 min e uma velocidade de arrefecimento de 1°C/min.

Após relaxação de tensões depositaram-se sequencialmente duas camadas de soldadura, uma sobre cada lado da junta, através do processo de soldadura MAG robotizado, usando parâmetros que originaram uma energia específica adicionada de aproximadamente 1 kJ/mm, tal como se apresenta na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros utilizados na soldadura das chapas e nas reparações.

| Soldadura     | Corrente Soldadura [Amperes] | Tensão Soldadura [Voltes] | Velocidade Soldadura [mm/s] | Energia Específica [kJ/mm] | Débito Gás [l/min] |
|---------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1.ª Camada    | 207                          | 29,8                      | 6,5                         | 0,95                       | 15                 |
| 2.ª Camada    | 210                          | 26                        | 6                           | 0,91                       | 15                 |
| 1.ª Reparação | 215                          | 27                        | 5                           | 1,2                        | 15                 |
| 2.ª Reparação | 215                          | 27                        | 5                           | 1,2                        | 15                 |

Tabela 4. Composição química e propriedades mecânicas do eléctrodo de soldadura.

| Composição química |      |      | Propriedades mecânicas |                      |                             |  |
|--------------------|------|------|------------------------|----------------------|-----------------------------|--|
| % C                | % Si | % Mn | $\sigma_c$ [MPa]       | $\sigma_{max}$ [MPa] | Alongamento após rotura [%] | Energia de impacto, Kv [J] a $-20^\circ\text{C}$ |
| 0,10               | 0,85 | 1,50 | 470                    | 570                  | 25                          | 80   |

Tabela 5. Parâmetros experimentais utilizados na medição de tensões residuais pelo método de raios-X.

| Material                             | Plano difractor           | Ângulo de difracção $2\theta$ | Radiação incidente  | Diâmetro do colimador |
|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Fe- $\alpha$                         | (211)                     | $156^\circ$                   | K $\alpha$ -Cr      | 2 mm                  |
| Direcções de medida                  | Intervalo em $\psi$       | Número de ângulos $\psi$      | Oscilação em $\psi$ | Tempo de aquisição    |
| $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 90^\circ$ | $-39^\circ$ a $+39^\circ$ | 11                            | $\pm 2^\circ$       | 40 s                  |

Nas operações de soldadura utilizou-se o eléctrodo OK Autrod 12.51 (AWS A5 18: ER 70 5-6) da marca ESAB com 1mm de diâmetro e com composição química e propriedades mecânicas constantes da Tabela 4. Foi usado o gás de protecção Corgon 18 (Linde), constituído por 82% Ar e 18% CO<sub>2</sub>, tendo sido definido um fluxo de 15 litros por minuto.

Após as operações de soldadura foram executadas duas reparações sucessivas com uma energia específica de cerca de 1,2 kJ/mm (ver Tabela 3). As soldaduras foram realizadas num robô ABB IRB 1400, equipado com uma máquina de soldadura ESAB LUA 315R.

A 1ª reparação foi realizada sobre um entalhe com 200x9x5 mm, aberto longitudinalmente a meio do comprimento da segunda camada de soldadura. A 2ª reparação foi efectuada sobre um entalhe semelhante ao da 1ª reparação, aberto a meio da 1ª reparação, mas com apenas 100 mm de comprimento. A figura 1 ilustra a localização e geometria das reparações.

Mediram-se as tensões residuais na junta soldada, após a deposição das duas camadas de soldadura, e após a realização de cada uma das reparações, recorrendo-se ao método de difracção de raios-X. Os parâmetros utilizados nesta operação apresentam-se na Tabela 5. Os pontos de medição localizam-se ao longo de uma linha que atravessa o meio do cordão de soldadura e ao longo do eixo da soldadura, conforme se ilustra na Fig. 1. Os pontos de medição sofreram um polimento electrolítico prévio. O equipamento utilizado na medição das tensões residuais foi o modelo SET-X da marca ELPHYSE.

Após a medição das tensões residuais, foram extraídos da junta soldada provetes para análise metalográfica e medição de dureza (provetes com inicial “M” na sua designação) e outros para ensaios de tracção (provetes com inicial “T” na sua designação), conforme se mostra na Fig. 2a. A extracção dos provetes foi realizada em três zonas distintas a saber: “zona não reparada”, “zona reparada uma vez (a designação do provete apresenta R)” e “zona reparada duas vezes (RR)”.

Sobre os provetes metalográficos foram traçados mapas de dureza HV5 ao longo de duas linhas distintas, sendo uma localizada a cerca de 3 mm da superfície reparada (linha 2 da Fig. 2b) e outra disposta ao longo da espessura da zona fundida (linha 3 da Fig. 2b). As Fig.s 2c e 2d ilustram a geometria dos provetes utilizados nos ensaios de tracção para avaliar as propriedades do material de base e da zona fundida, respectivamente.

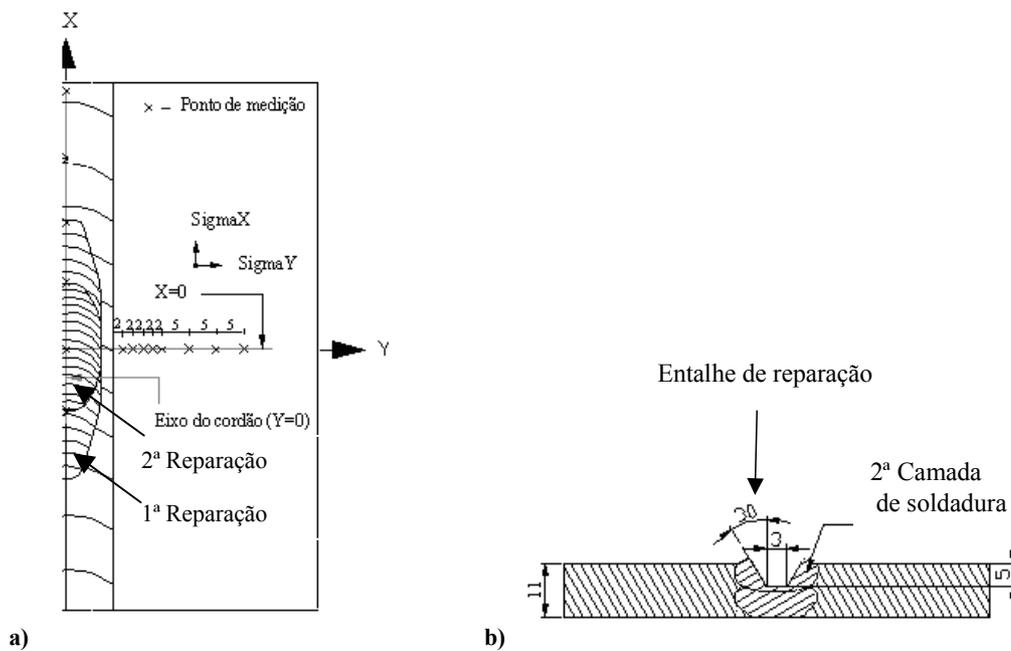


Fig. 1. Representação esquemática da localização e geometria das reparações, bem como dos pontos de medição das tensões residuais: a) vista superior; b) secção transversal.

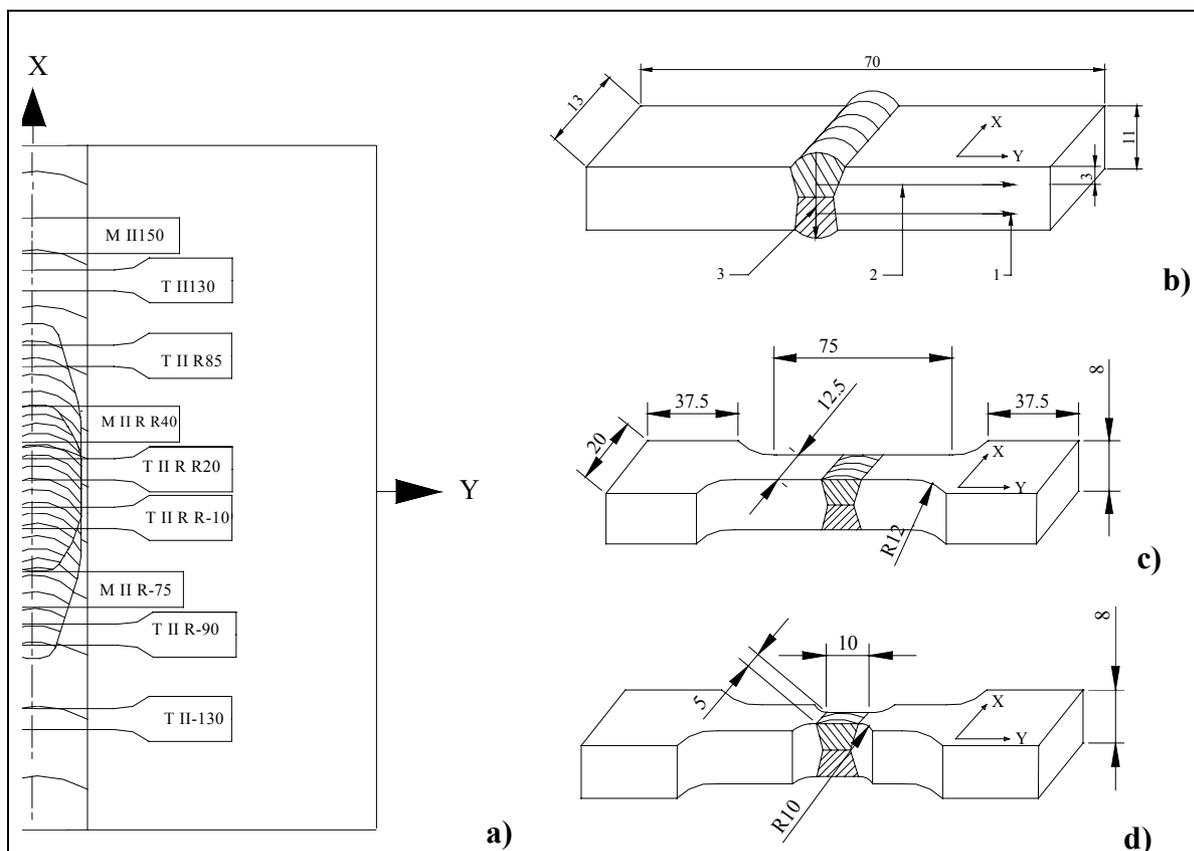


Fig. 2. Provetes de análise metalográfica e das propriedades mecânicas: a) localização; b) provete de análise metalográfica e medição de dureza; c) provete de ensaio de tracção do material de base; d) provete de ensaio de tracção da zona fundida (em d, o troço com secção transversal reduzida corresponde à zona fundida).

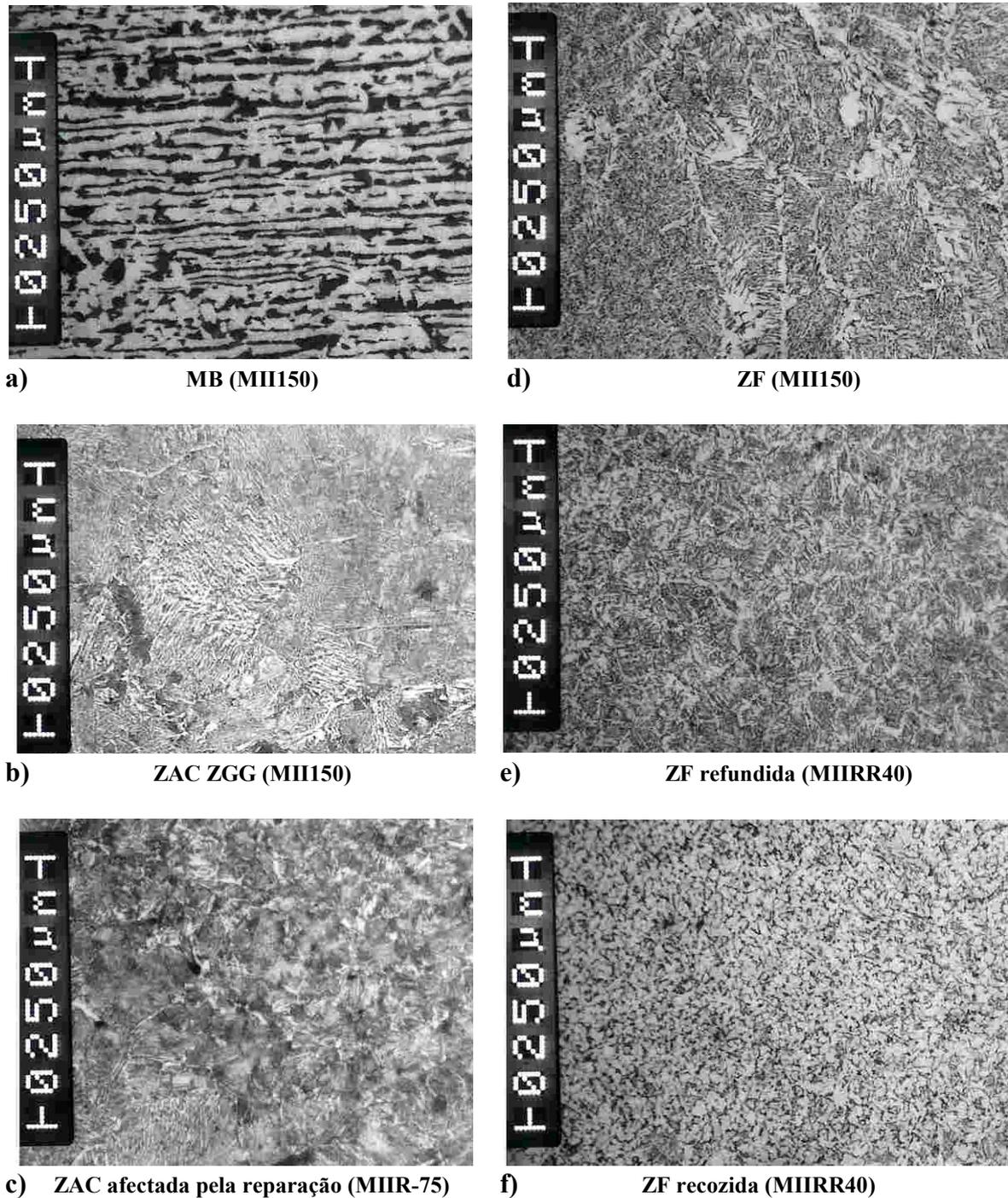


Fig. 3. . Micrografias da soldadura: a) MB; b) e c) ZAC; d), e), f) ZF.

### 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

#### 3.1. Microestrutura

Em qualquer um dos provetes metalográficos (MII150, MIIR-75 e MIIRR40) verifica-se a existência de três zonas distintas: zona fundida (ZF), zona afectada pelo calor (ZAC) e metal de base (MB). Todas estas amostras apresentam um gradiente contínuo de microestruturas em função da distância (Y) ao eixo da

soldadura, e ao longo da espessura (Z) da ZF. As reparações afectaram as microestruturas na ZAC e, sobretudo, na ZF. A representação micrográfica, mostrada na Fig. 3, ilustra as microestruturas observáveis em diferentes pontos de secções transversais da junta soldada.

O MB (Fig. 3a) é constituído por ferrite, representada pelas zonas claras, e perlite, representada pelas zonas escuras. Estas fases apresentam-se alinhadas segundo a direcção de laminagem, apresentando uma morfologia em banda.

Na Fig. 3b é possível observar a subzona da ZAC de grão grosseiro, presente em todas as amostras. Esta subzona apresenta alguma ferrite primária nas fronteiras de grão da austenite prévia. A microestrutura presente no interior dos grãos da austenite prévia poderá ser bainite inferior ou eventualmente martensite autorevenida. Esta dúvida só pode ser esclarecida através da microscopia electrónica de transmissão. Observa-se ainda alguma ferrite em placas. Esta microestrutura não foi significativamente afectada por ciclos térmicos posteriores.

A microestrutura apresentada na Fig. 3c, obtida num ponto da secção reparada uma vez, corresponde à subzona da ZAC de grão grosseiro refinado posteriormente pelos ciclos térmicos decorrentes da 1.ª reparação. As fronteiras de grão apresentam alguma ferrite primária, de cor clara. A microestrutura observável no interior dos grãos parece ser a bainite inferior e alguns agregados de ferrite e carbonetos.

A Fig. 3d mostra as características da microestrutura observável na ZF não afectada por qualquer ciclo térmico posterior.

Nessa imagem é visível a presença da ferrite primária nas fronteiras dos grãos da austenite resultante da solidificação primária. Esta ferrite é também chamada de ferrite alotriomorfo pelo facto de os grãos não apresentarem forma geométrica regular [7, 9]. A estrutura fina presente no interior do grão é constituída basicamente por ferrite acicular (zonas claras) e, provavelmente, uma mistura de ferrite e carbonetos.

As características microestruturais da zona fundida da segunda camada de soldadura refundida pelas reparações posteriores apresentam-se ilustradas na Fig. 3e. É evidente a ocorrência de refinamento dos grãos após a refusão. O interior dos grãos apresenta-se constituído por agregados de ferrite e carbonetos. Nas fronteiras nota-se a presença de ferrite primária, formada no decurso da solidificação da camada refundida.

A microestrutura apresentada na Fig. 3f corresponde a um ponto da ZF localizado na 1.ª camada de soldadura. Esta zona sofreu um recozimento em virtude de ciclos térmicos posteriores decorrentes do depósi-

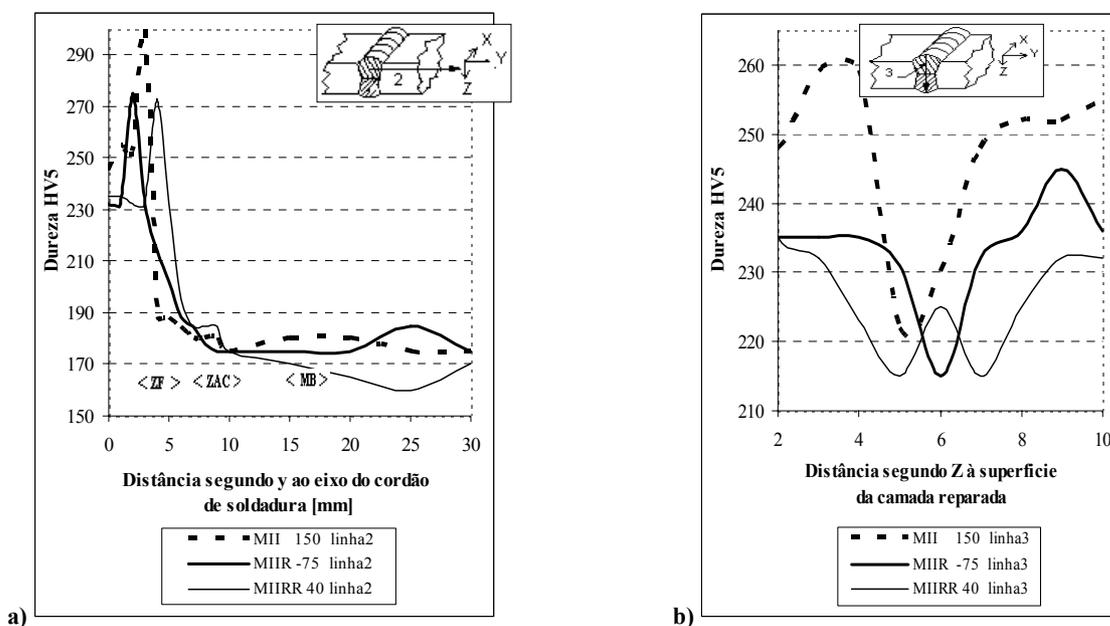


Fig. 4. Distribuição da dureza em secções transversais da soldadura, não reparada (MII), reparada uma vez (MIIR) e reparada duas vezes (MIIRR): **a)** ao longo da linha 2, localizada a 3 mm da superfície da camada reparada; **b)** ao longo da linha 3, localizada no eixo da zona fundida.

to da 2.<sup>a</sup> camada de soldadura e eventualmente das camadas de reparação. Por consequência, nota-se um refinamento do grão. Trata-se, portanto, de uma estrutura muito fina constituída por ferrite equiaxial e carbonetos decorrentes do reaquecimento pouco acima de  $Ac_3$  da ZF prévia. A execução de sucessivas camadas de reparação na ZF aumenta a proporção de zonas com microestruturas idênticas às ilustradas nas Fig.s 3e e 3f, o que geralmente tem efeitos favoráveis em termos de tenacidade [10].

### 3.2. Dureza

Na Fig. 4 apresenta-se a distribuição de dureza HV5 em três secções transversais distintas da soldadura, a saber: zona não reparada (MII), zona reparada uma vez (MIIR) e zona reparada duas vezes (MIIRR).

Na Fig. 4a ilustra-se a distribuição da dureza em função da distância ao eixo da ZF, ao longo da linha 2, conforme se mostra no esboço da referida figura. Em qualquer das amostras o pico de dureza ocorre na ZAC, concretamente, na vizinhança da linha de fusão, apresentando valores próximo de 300 HV5, para a amostra não reparada, e próximo de 270 HV5 para as reparadas uma ou duas vezes. Ocorreu, portanto, uma diminuição de dureza na ZAC após a 1.<sup>a</sup> reparação. Estes valores de dureza máxima na ZAC sugerem que as estruturas nesta zona são constituídas essencialmente por bainite e martensite [11]. O MB apresenta uma dureza que ronda 170 HV5.

Conforme a Fig. 4b, a dureza da ZF decresceu progressivamente após as reparações. Antes de qualquer reparação, a dureza máxima registada (cerca de 260 MPa) ocorre próximo da superfície, do lado da camada reparada. Em qualquer das curvas apresentadas na Fig. 4b, a dureza decresce da superfície para o interior onde atinge um mínimo de cerca de 215 HV5. Esta dureza ocorre na zona onde se observam as estruturas ilustradas nas Fig.s 3e e 3f. A Fig. 4b mostra também que a largura da zona onde estão presentes as estruturas macias aumenta substancialmente após a segunda reparação.

### 3.3. Propriedades de tracção e tensões residuais

A Tabela 6 apresenta as propriedades mecânicas médias do MB e da ZF das juntas soldadas e reparadas, obtidas a partir de ensaios de tracção. Verifica-se que a tensão de cedência da zona fundida sofre uma ligeira redução com a execução das sucessivas reparações. A tensão de cedência nesta zona permanece contudo bem acima da do material de base. A resistência à tracção e o alongamento na carga máxima apresentam mesmo um ligeiro aumento. A execução de reparações não altera significativamente as propriedades mecânicas das soldaduras neste aço C-Mn. Convém referir que, neste caso, a abertura dos entalhes para reparação foi feita por corte por arranque de apara. Se a abertura dos entalhes fosse feita por meios térmicos, as zonas afectadas pelo calor seriam mais extensas e as conclusões poderiam ser diferentes.

A Fig. 5 apresenta a distribuição das tensões residuais longitudinais ( $\sigma_x$ ) e transversais ( $\sigma_y$ ) ao longo da linha transversal ao eixo do cordão de soldadura, passando a meio do comprimento deste cordão.

Conforme a Fig. 5a, ocorreu um aumento, e depois uma ligeira diminuição, da tensão residual longitudinal, respectivamente após a 1.<sup>a</sup> e a 2.<sup>a</sup> reparações. A máxima tensão residual longitudinal registada (300 MPa) ocorreu no eixo do cordão de soldadura após a 1.<sup>a</sup> reparação. Este valor é inferior a qualquer dos

Tabela 6. Propriedades mecânicas do material de base e da zona fundida da soldadura.

| Provete                        | Tensão limite elástico<br>$\sigma_c$ [MPa] | Resistência à tracção<br>$\sigma_{max}$ [MPa] | Deformação à carga<br>max. [%] $\epsilon_{max}$ |
|--------------------------------|--|---|---|
| Metal base                     | 312  | 557   | 15,3  |
| Zona fundida não reparada TII  | 497  | 600   | 16  |
| Zona fundida reparada 1x TIIR  | 493  | 605   | 16,2  |
| Zona fundida reparada 2x TIIRR | 467  | 627   | 17,7  |

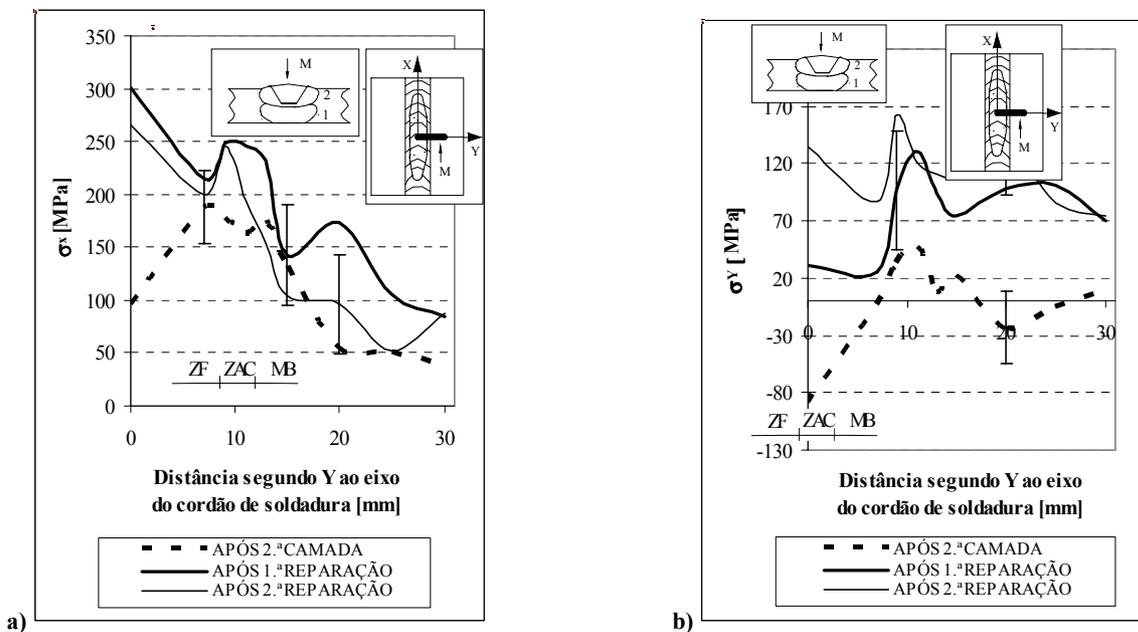


Fig. 5. Distribuição de tensões residuais ao longo duma linha transversal ao cordão, assinalada nos gráficos pela seta que acompanha a letra M (de medição): a) tensão longitudinal ( $\sigma_x$ ); b) tensão transversal ( $\sigma_y$ ).

limites elásticos da ZF, apresentados na Tabela 6. Quanto à tensão residual transversal (Fig. 5b), o valor máximo registado ronda os 160 MPa e ocorreu após a 2.ª reparação. Verifica-se que há um crescimento das tensões residuais transversais com a realização das reparações. Estas tensões residuais mudam mesmo de sinal na ZF, passando de compressão para tracção.

A distribuição das tensões residuais longitudinais ( $\sigma_x$ ) e transversais ( $\sigma_y$ ) apresentadas na Fig. 6 corresponde ao eixo do cordão de soldadura.

A Fig. 6a clarifica o comportamento em termos de evolução dos níveis de tensões residuais longitudi-

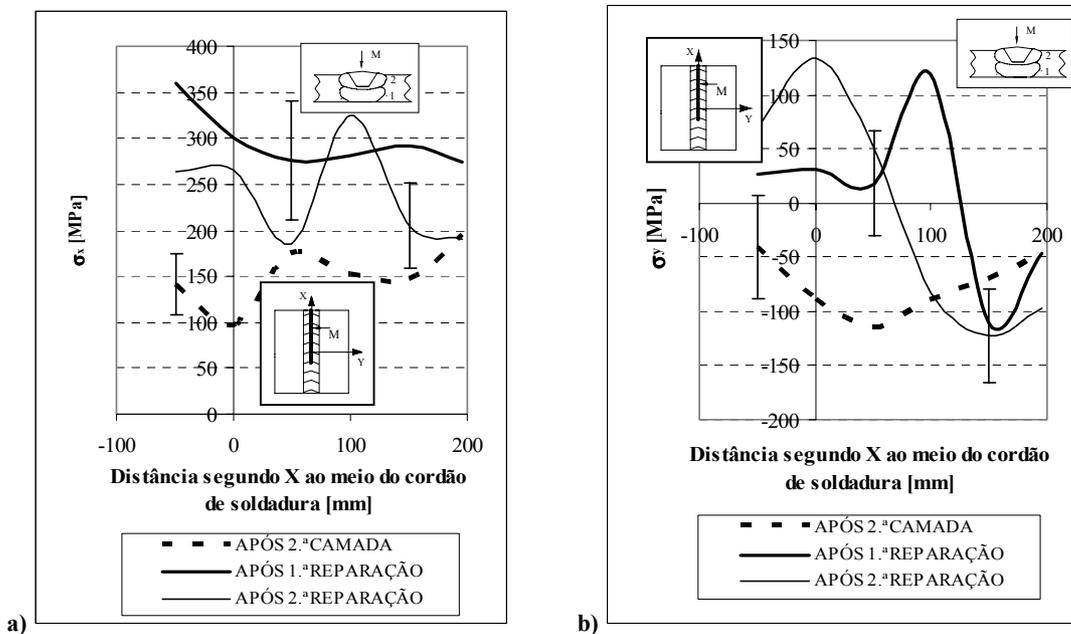


Fig. 6. Distribuição de tensões residuais ao longo do eixo do cordão de soldadura, assinalada nos gráficos pela seta que acompanha a letra M (de medição): a) tensão longitudinal ( $\sigma_x$ ); b) tensão transversal ( $\sigma_y$ ).

nais com as sucessivas reparações, mostrando que o aumento dessas tensões após a realização da 1ª reparação e sua ligeira diminuição após a 2ª reparação, sugerida pela distribuição da Fig. 5a, é um facto que tende a ocorrer ao longo do comprimento da zona reparada. Contudo o comportamento descrito não é linear na medida em que se nota alguma irregularidade, que se traduz pelo facto de haverem pontos cujas tensões residuais longitudinais cresceram com a realização da segunda reparação. As tensões residuais longitudinais ao longo do eixo da soldadura, quer antes quer após a realização das reparações, são na sua generalidade de tracção, e assumem valores mínimos e máximos de cerca de 100 MPa e 350 MPa, respectivamente, tendo ambos os valores ocorrido na região intermédia da soldadura.

A Fig. 6b indica que a realização da 1ª reparação ocasionou a passagem de tensões residuais transversais de valores compressivos (máximo de cerca de 115 MPa) para valores de tracção (máximo de cerca de 120 MPa), numa distância não superior a cerca de 100 mm relativamente ao meio do comprimento da soldadura. Este intervalo compreende a zona da 1ª reparação. Para além dos 100 mm, as tensões transversais após 1ª reparação tendem a assumir valores compressivos (máximo 115 MPa). Após 2ª reparação (Fig. 6b), as tensões residuais transversais aumentaram de magnitude em tracção, numa zona dentro do comprimento reparado, atingindo um valor máximo de cerca de 135 MPa, e evoluindo fora desta zona para valores compressivos de grandeza máxima de cerca de 120 MPa.

Convém salientar que, em qualquer dos casos, os valores máximos das tensões residuais transversais atingidos são inferiores aos das tensões residuais longitudinais na mesma zona, e que os valores destas últimas são, na globalidade, inferiores ao limite elástico do material da zona onde ocorrem.

#### 4. CONCLUSÕES

A realização das reparações por soldadura ocasionou alterações ao nível da microestrutura, das propriedades mecânicas e das tensões residuais.

Relativamente à microestrutura, as reparações provocaram essencialmente uma refinação do grão preexistente na zona afectada pelo calor e sobretudo na zona fundida, que se traduz globalmente por um aumento da proporção de estruturas refinadas na soldadura.

As reparações induziram sucessivamente uma ligeira redução da dureza e tensão limite elástico da zona fundida.

A distribuição das tensões residuais numa linha a meio e transversal ao cordão de soldadura, no lado da camada reparada, mostra que as tensões residuais longitudinais cresceram após 1ª reparação, e diminuíram ligeiramente com a realização da 2ª reparação, apresentando no entanto valores de magnitude superior à magnitude verificada antes de qualquer reparação. As tensões residuais transversais aumentaram sucessivamente com a realização das reparações, tendo mesmo essas tensões mudado de sinal na zona fundida, passando de compressão para tracção.

A distribuição das tensões residuais ao longo do eixo do cordão de soldadura, no lado da camada reparada, mostra que as tensões residuais longitudinais apresentam uma evolução semelhante à verificada na linha transversal, ou seja, aumentaram com a realização da 1ª reparação e diminuíram ligeiramente após 2ª reparação. As tensões residuais transversais, que eram globalmente compressivas antes de qualquer reparação, passaram a ser de tracção, dentro do comprimento correspondente à 1ª reparação, continuando compressivas, embora com perfil de distribuição ligeiramente diferente, fora das reparações. Após a 2ª reparação, as tensões residuais transversais aumentaram de magnitude em tracção e em compressão, respectivamente dentro do comprimento da 2ª reparação e fora do seu comprimento.

Apesar de na generalidade se verificar um aumento de magnitude das tensões residuais, em compressão ou em tracção, após a realização das reparações, o valor máximo atingido pelas tensões residuais em cada zona não atingiu a tensão limite de elasticidade do material dessa zona.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, prestado através do programa POCTI (Programa Operacional Ciência, Tecnologia e Inovação). A Comunidade Europeia, o Governo

Português e o FEDER fazem parte deste programa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] K. W. Mahin, W. Winters, T. M. Holden, R. R. Hosbons and S. R. MacEWeN, “Prediction and Measurement of Residual Elastic Strain Distribution in Gas Tungsten Arc Welds”, *Welding Journal*, **70** (9), 245s–258s (1991)
- [2] J. J. Janosch, J. B. Roelens and H. Koneczny, “Definition of a Materials Data Base for Heavy Structures, Created by Numerical Simulation of Welding and Experimental Characterization of Toughness – Impact Strength”; IIW DOC. X-1293-94 (1994)
- [3] J. D. Kim, C. J. Kim, C. M. Chung, “Repair welding of etched tubular components of nuclear power plant by Nd:YAG Laser”, *Materials Processing Technology*, **114** (2), 51-56 (2001)
- [4] A. K. Bhaduri, S. K. Rai, T. P. S. Gill, S. Sujith and T. Jayakumar, “Evaluation of Repair Welding Procedures for 2.25Cr – 1Mo and 9Cr – 1Mo Steel Welds”, *Science and Technology of Welding and Joining*, **6** (2), 89-93 (2001)
- [5] A. Loureiro, “High temperature behaviour of repaired welded joints in refractory steels”, 3<sup>rd</sup> Int. HIDA and integrity conference – Integrity of high temperature repair welds, 185 – 197, Oeiras, Portugal, Sept (2002)
- [6] I. Samardzic and T. Siewert, “Reliability improvements in repair welding of high-strength steels”, IIW Doc. IX-2002-0 (2002)
- [7] C. Veiga, A. Loureiro and A. Dias, “Residual stress evolution in repair welds”, *Int. J. For Strain Measurement*, **39** (2003).
- [8] R. Viswanathan, D. Gandy, S. Findlan, “Weld repair of steam turbine casings and piping – an industry survey”, *J. P. V. Technology*, **123** (2), 157-160 (2001)
- [9] H. K. D. H. Bhadeshia, “*Modelling of Steel Welds*”, *Materials Science and Technology*, **8** (2), February, 123-133 (1992)
- [10] M. R. Wenman, M. Novovic and P. Bowen; “The effect of microstructure on the fracture toughness of a C-Mn weld metal”, *Advances in Mechanical Behaviour, Plasticity and Damage*, vols 1 and 2, Ed. Miannay D., Costa P., Francois D. and Pineau A., 1421–1426, EUROMAT (2000)
- [11] Ot. Kojima, N. Yurioka, T. Kasuya, C. Shiga, K. Ikeuchi and M. Takahashi, “Result or Round Robin Test on HAZ microstructure”, IIW, Commission IX., 1-13 July (1999)

## EFFECT OF SUCCESSIVE REPAIRS BY WELDING

**Abstract** – The aim of this work is to analyse the evolution of the microstructure, mechanical properties and residual stresses in welded joints made on a C-Mn steel, when submitted to two successive repairs by welding. For this purpose, coupon plates with 400x180x11 mm size were prepared with square butt edges, submitted to a residual stress release heat treatment and, next, welded by gas metal arc welding process, using two weld beads. After deposition of the weld beads, two successive repairs were made, also using gas metal arc welding. Residual stresses were measured after deposition of the two weld beads and after each repair bead deposition. Residual stress measurements were conducted on the plate surface, along a line perpendicular to the weld direction and along the weld axis. Finally, samples were prepared from weld joint material and used for metallographic analysis, hardness measurement and tensile tests. The weld repairs caused changes in the microstructure, in mechanical properties and in residual stress fields pre-existent in repaired regions. Refined microstructure appeared both in heat affected zone and melted zone. The two repair welds originated some decrease in hardness and yield stress of melted zone. These repairs caused also, essentially in repaired zone, an increase in longitudinal and transversal residual stresses. However, neither longitudinal residual stress, nor transversal residual stress attained the yield stress of the material where they occur.