

# RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS REABILITADAS POR REFUSÃO TIG E PLASMA

A.L. RAMALHO\*, J.A.M. FERREIRA\*\*, C.M. BRANCO\*\*\*

\* Escola Superior de Tecnologia, Castelo Branco

\*\* Departamento de Engenharia Mecânica, FCT, Universidade de Coimbra

\*\*\* Departamento de Engenharia Mecânica, IST, Universidade Técnica de Lisboa

**Resumo.** As técnicas de refusão do pé do cordão de soldadura por TIG e plasma são frequentemente usadas para aumentar a resistência e a fiabilidade de peças solicitadas à fadiga. Neste trabalho apresentam-se resultados de um estudo de investigação sobre a utilização destas técnicas na recuperação da resistência à fadiga de juntas soldadas em T solicitadas por flexão em três pontos. As juntas são fabricadas em aço St 52 – 3 e obtidas por soldadura com eléctrodo revestido. São estudadas quatro situações: juntas não tratadas, juntas tratadas por refusão TIG, juntas pré-fissuradas e posteriormente tratadas por refusão TIG e juntas pré-fissuradas e posteriormente tratadas por refusão plasma. A eficiência dos tratamentos de refusão TIG e plasma na reabilitação da resistência à fadiga é analisada e discutida com base nos resultados de fadiga e em elementos complementares determinados durante a investigação, tais como: o perfil do pé dos cordões, a microestrutura e os perfis de dureza nas regiões soldada e afectada térmicamente e dos defeitos detectados no cordão. A eficiência obtida pelo processo de refusão por plasma é bastante satisfatória e muito superior à da refusão por TIG.

**Abstract.** TIG and plasma dressing at the weld toe are frequently used to increase the fatigue strength and the reliability of welded joints. This paper presents results obtained on a fatigue study in which these techniques are applied to try the rehabilitation of T welded joints loaded in bending. The welded joints are made in St 52-3 steel and are obtained by covered electrode process. Four cases are studied: as welded joints, improved joints by TIG dressing, welded joints with fatigue cracking at the weld toes and treated by TIG remelt and welded joints with fatigue cracking at the weld toes and treated by plasma remelt. The efficiency of TIG and plasma treatments in the rehabilitation of joints is analysed and discussed attending to the fatigue results and other elements such as: the geometric profile at the weld toe, the microstructure of the material, the hardness profile and the defects in the fillet. The efficiency of plasma remelt is satisfactory and better than TIG remelt.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos processos de soldadura o recurso a técnicas de melhoria no pé do cordão permitem aumentos significativos na resistência mecânica e fiabilidade dos cordões. Com tratamentos locais no pé do cordão é possível, não só melhorar o comportamento à fadiga de juntas soldadas, mas também reabilitar juntas fissuradas por efeito de fadiga ou corrosão. O detalhe danificado pode ser tratado localmente e desta forma poderá ser mantido em serviço com segurança e fiabilidade, aumentando

significativamente a vida da estrutura. Estes tratamentos locais são mais económicos que a reparação integral do cordão.

A maioria das técnicas de melhoria da resistência à fadiga no pé do cordão foram introduzidas durante a década de 1960-1970. A descrição destas técnicas encontra-se referida na literatura [1 e 2]. Os benefícios no comportamento mecânico de juntas soldadas tratadas com estas técnicas, designadamente no que se refere ao aumento da resistência à fadiga, têm sido demonstrados em diversos trabalhos de investigação. Foi realizada uma

compilação e análise estatística de resultados obtidos em diversos trabalhos de investigação sobre técnicas de melhoria no pé do cordão de juntas soldadas, que indica clara vantagem na utilização destes tratamentos [3]. Uma destas técnicas, o afagamento do pé do cordão, face aos comprovados benefícios que apresenta, foi considerada em alguns códigos de projecto de estruturas [4-5]. Algumas técnicas de melhoria que diversos trabalhos de investigação indicam como mais eficientes, nomeadamente a refusão TIG e plasma, ainda não são contempladas nos códigos de projecto.

Nesta comunicação faz-se uma apresentação preliminar de resultados obtidos num estudo sobre o comportamento de juntas soldadas em T, submetidas a tratamento de refusão TIG e plasma do pé do cordão, solicitadas sem transferência de carga por um carregamento pulsante sinusoidal de flexão em três pontos.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 2.1 Material

O material utilizado neste estudo é um aço estrutural ao carbono de média resistência, St 52-3 DIN 17100, fornecido em chapas laminadas de 12.5mm de espessura, cuja composição química e propriedades mecânicas são apresentadas nas tabelas 1 e 2.

**Tabela 1.** Composição química do aço St52-3 (percentagem em peso)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti
0.131	0.413	1.44	0.063	0.024	0.034	0.009
Al	V	Cu	Co	Nb	P	S
0.029	0.043	0.018	0.013	0.005	0.011	0.005

**Tabela 2.** Propriedades Mecânicas do aço St52-3 (valores médios de 5 ensaios)

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>r</sub> [MPa]	A [%]
555.2	383.7	22.53

As propriedades mecânicas foram obtidas em ensaio de tracção à temperatura ambiente com provetes de 6.25mm de diâmetro e segundo a norma NP – EN 10 002-1.

### 2.2 Processos de soldadura/refusão

#### 2.2.1 Soldadura da junta

Foram construídos provetes em construção soldada, constituídos por uma placa horizontal e um cutelo soldado, formando uma junta em T com baixa penetração. Os provetes assim formados tinham 70mm de largura, 270mm de comprimento e 70mm de altura (inclui a altura do cutelo e a espessura da placa horizontal). O cordão de canto da junta soldada em T tem uma largura média de 9mm.

Os cordões foram realizados pelo processo de eléctrodo revestido usando os seguintes parâmetros:

- arame de 4mm de diâmetro;
- intensidade de corrente de 200A;
- tensão DC positiva de 22V;
- passe único ao abaixo.

A composição química do metal de adição encontra-se representada na tabela 3.

**Tabela 3.** Composição química do metal de adição (percentagem em peso)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
0.08	0.45	1.28	0.50	1.87	0.37	0.017	0.01

#### 2.2.2 Refusão TIG

No processo de tratamento por refusão TIG foram utilizados os seguintes parâmetros de soldadura:

- intensidade de corrente de 110A;
- tensão DC de 19V;
- velocidade linear de 1.08mm/s.

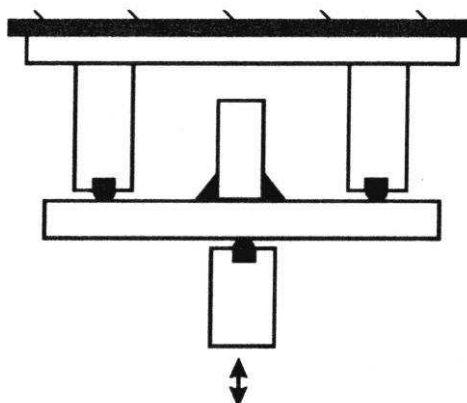
#### 2.2.3 Refusão plasma

No processo de tratamento por refusão plasma foram utilizados os seguintes parâmetros de soldadura:

- fluxos de Argon;
- intensidade de corrente de 200A;
- Tensão DC de polaridade directa de 30V;
- velocidade linear de 2.47mm/s.

### 2.3 Ensaios de fadiga

Os provetes obtidos por construção soldada foram submetidos a uma solicitação de fadiga em máquina servo-hidráulica de tracção/compressão com capacidade de 100kN. Através de montagem apropriada os provetes foram submetidos a uma solicitação de flexão em três pontos, conforme representado na figura 1. Os ensaios decorreram com controlo de carga com variação sinusoidal com frequência de 7Hz e com razão de tensão aproximadamente nula ( $R=0$ ).



**Fig.1** Representação esquemática da montagem usada para aplicação do carregamento.

Foram ensaiados 40 provetes, distribuídos em 4 séries conforme o tratamento de melhoria utilizado no pé dos cordões, com a seguinte designação:

AW – Série constituída por provetes como soldados, sem qualquer tratamento de melhoria, ensaiados com carregamento de fadiga até à rotura;

TAS – Série constituída por provetes que após soldadura foram submetidos ao processo de melhoria por refusão TIG no pé do cordão,

sendo posteriormente ensaiados com carregamento de fadiga até à rotura;

TDR – Série constituída por provetes como soldados e submetidos a carregamento de fadiga até à detecção macroscópica de fendas no pé dos cordões; posteriormente estes provetes são reparados com tratamento de refusão TIG no pé dos cordões, sendo de seguida ensaiados com carregamento de fadiga até à rotura;

PDR – Série constituída por provetes como soldados e submetidos a carregamento de fadiga até à detecção macroscópica de fendas no pé dos cordões; posteriormente estes provetes são reparados com tratamento de refusão plasma no pé dos cordões, sendo de seguida ensaiados com carregamento de fadiga até à rotura.

### 2.4 Ensaios de dureza Vickers

Foram obtidas filiações longitudinal e transversal de dureza Vickers na placa horizontal de provetes das quatro séries, junto ao pé do cordão. Foi usada uma carga de 0.3kgf aplicada durante 15s.

### 2.5 Microestrutura

Utilizando um microscópio óptico com câmara incorporada obtiveram-se micrografias da estrutura metalográfica do metal fundido, da zona afectada pelo calor e do metal de base para diferentes tipos de provetes ensaiados.

### 2.6 Caracterização geométrica do pé do cordão

Utilizando equipamento específico foi efectuada medições dos raios e ângulos de concordância do pé dos cordões dos provetes ensaiados. Os resultados obtidos foram sujeitos a análise estatística.

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 3.1 Caracterização geométrica do pé dos cordões - raios de concordância

Os resultados obtidos para a série de provetes TDR, dois raios de concordância por provete, foram tratados estatisticamente tendo-se obtido um raio médio de 5.357 mm e um desvio padrão de 1.2157. Comparados estes resultados com os obtidos para a série AW [6] verifica-se um aumento de cerca de 30% do raio médio de concordância.

Na série PDR verificou-se que a amostragem efectuada apresentava uma grande dispersão, pelo que se considerou que os dados obtidos não eram significativos para estabelecer a caracterização pretendida. Este facto deve-se a uma variação considerável da geometria do cordão de refusão ao longo da largura do provete. Os provetes tinham sido submetidos a uma refusão plasma com profundidade de cerca de 4-5 mm, sem penetração total. O refluxo dos gases associados ao processo de soldadura, provocou, além de diversos poros no cordão, uma má formação geométrica dos bordos do cordão, conduzindo a baixos raios de concordância nos seus bordos superior e inferior. Assim a melhoria das características geométricas do pé do cordão para efeitos de comportamento à fadiga, típica da passagem suplementar de refusão plasma não se verificou neste caso. A profundidade de penetração da refusão de cerca de 40% da espessura do provete, requerida pelas pré-fissuras, conduziu a parâmetros de soldadura que não são os usuais na passagem suplementar de refusão plasma. De momento estão em curso ensaios adicionais que permitam a caracterização geométrica do pé dos cordões destes provetes. No entanto os dados já obtidos indiciam raios médios bastante inferiores aos da série AW.

### 3.2 Ensaio de dureza

Na figura 2 estão representados os resultados de distribuição de durezas ao longo das direcções longitudinal e transversal do provete TDR 10. A filiação longitudinal apanha as zonas fundida (ZF) e afectada pelo calor (ZAC) do cordão correspondente à refusão TIG e foi obtida paralelamente à superfície

superior do provete a cerca de 0.1 mm de profundidade. A filiação transversal foi iniciada no pé do cordão. Os picos de dureza na ZAC são próximos de 270 HV0.3 e na ZF são próximos de 300 HV0.3. No metal de base a dureza é mais baixa oscilando entre 180 e 200 HV1.

Na figura 3 estão representados os resultados de distribuição de durezas ao longo das direcções longitudinal e transversal do provete PDR 2. A filiação longitudinal apanha as ZF e ZAC do cordão correspondente à refusão plasma e foi obtida paralelamente à superfície superior do provete a cerca de 0.3 mm de profundidade. A filiação transversal foi iniciada junto ao bordo superior do cordão de refusão a cerca de 0.1 mm de profundidade. Os picos de dureza na ZAC são próximos de 340 HV0.3 e na ZF são próximos de 400 HV0.3. No metal de base a dureza é mais baixa oscilando entre 180 e 200 HV1.

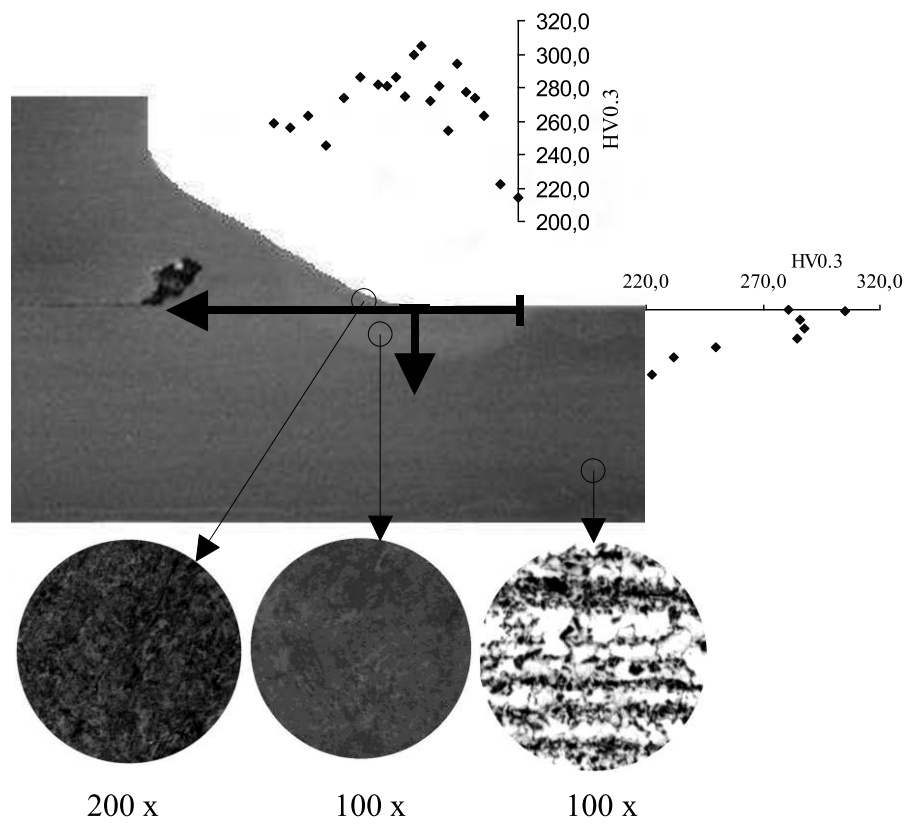
### 3.3 Microestrutura

Nas figuras 2 e 3 também estão representadas as micrografias das estruturas da ZF e da ZAC do cordão correspondente às refusões TIG e plasma, respectivamente, bem como a correspondente ao metal de base.

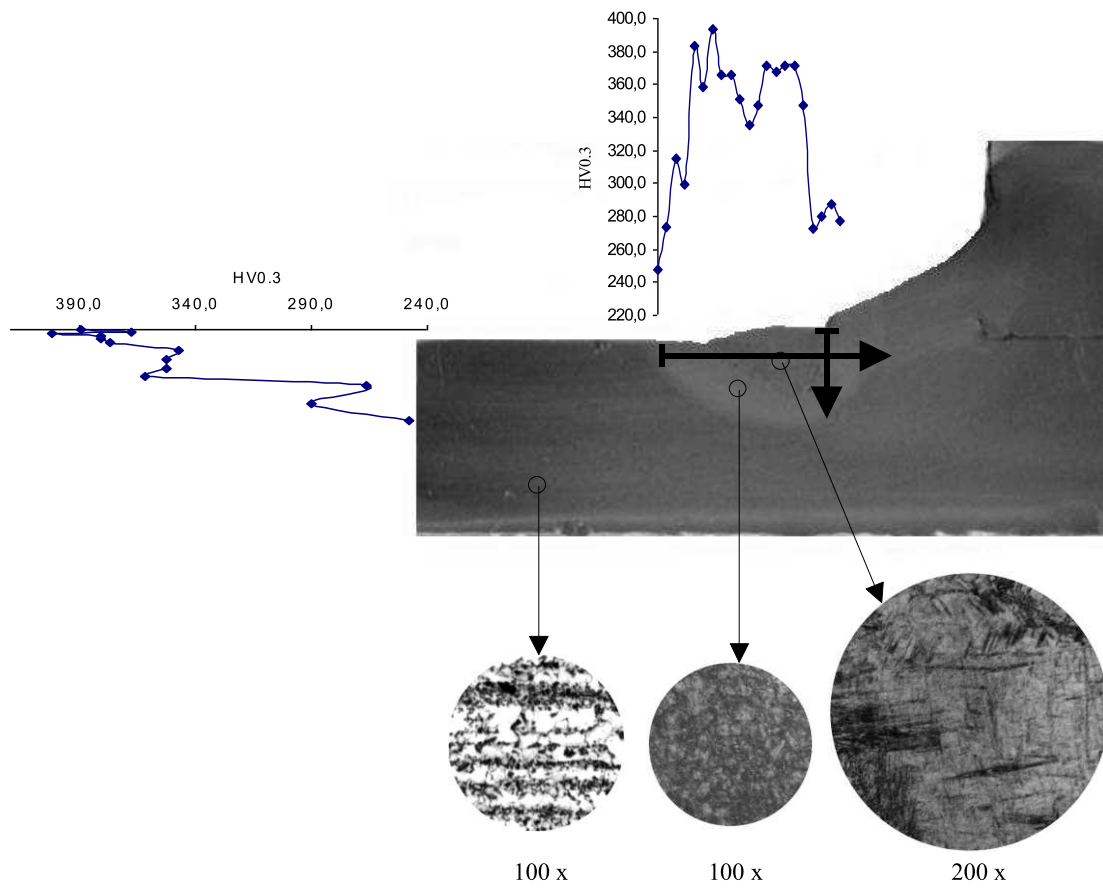
A microestrutura do metal de base é característica de um aço hipoeutectoide, constituída por grãos de ferrite e de perlite eutectoide. O processo de fabrico das chapas induziu um alinhamento preferencial dos grãos de perlite, em diversas camadas, ao longo da direcção longitudinal de laminação.

No que se refere à morfologia das ZAC e ZF dos cordões de refusão TIG e plasma, embora através de microscopia óptica não seja possível caracterizar com rigor estas estruturas, conjugando as micrografias obtidas com os perfis de dureza, com a composição química e recorrendo a modelos de previsão [7], foi possível efectuar a seguinte caracterização.

Cordão de refusão TIG



**Fig.2** Distribuição de durezas e microestrutura – Provete TDR 10.



**Fig.3** Distribuição de durezas e microestrutura – Provet PDR 2.

A ZF é constituída essencialmente por ferrite acicular fina e por bainite, com pouca ferrite primária nas fronteiras de grão da austenite prévia.

A ZAC é constituída por bainite superior e inferior, apresentando contudo uma fracção sensível de ferrite primária na fronteira de grão e mesmo alguma ferrite em placas. Esta maior predominância da ferrite e engrossamento do grão justifica uma dureza na ZAC ligeiramente inferior à da ZF.

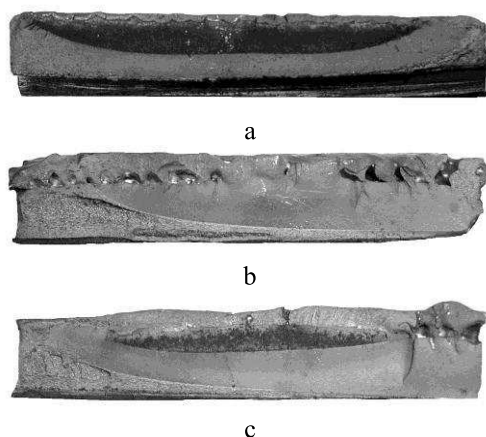
#### Cordão de refusão plasma

A ZF apresenta uma estrutura muito fina e constituída essencialmente por martensite auto-revenida, parecendo apresentar uma pequena fracção de bainite inferior.

A ZAC aparenta ser constituída por bainite superior e inferior e por uma pequena fracção de martensite. Verifica-se um pequeno crescimento da austenite prévia na zona de grão grosseiro da ZAC.

#### 3.4 Ensaios de fadiga das juntas soldadas

A figura 4 apresenta macrografias de superfícies de fractura típicas de provetes das séries TDR e PDR.



**Fig.4** Macrografias das superfícies de fractura.

Em 4-a está representada a macrografia da superfície de fractura de TDR 10, onde são visíveis a fenda prévia, o cordão de refusão TIG e a zona de propagação da pré-fissura até à rotura. Como se pode verificar a penetração da refusão TIG foi claramente insuficiente para promover a reparação da junta pré-fissurada.

Em 4-b está representada a macrografia da superfície de fractura de PDR 2, onde é visível o cordão de refusão com diversos poros e diversas zonas de iniciação de fendas bem como a zona de propagação de fenda até à rotura. Não existem sinais das fendas prévias.

Em 4-c está representada a macrografia da superfície de fractura de PDR 3, onde é visível o cordão de refusão com diversos poros, uma fenda prévia não reparada e a zona de propagação desta fenda até à rotura.

A figura 5 representa as curvas S-N dos resultados obtidos nos ensaios de fadiga dos provetes das quatro séries: AW, TAS, TDR e PDR.

Obtiveram-se as melhores aproximações para os resultados, admitindo uma regressão linear entre as funções logarítmicas da amplitude de tensão e do n.º de ciclos até à rotura. Os resultados obtidos conduziram a equações da forma  $N_r \Delta \sigma^m = K_0$ . Estas curvas médias encontram-se representadas na figura para as quatro séries, correspondendo às equações que aí são apresentadas. Os coeficientes de correlação correspondentes às aproximações efectuadas também são representados na figura. Estes parâmetros encontram-se representados de forma explícita na tabela 4.

Tabela 4. Equações das curvas S-N médias  $N_r \Delta \sigma^m = K_0$  r – coeficiente de correlação

Série	$K_0$	M	r
AW	4848.6	- 0.21044	0.94332
TAS	5817.1	- 0.22421	0.96713
TDR	3744.5	- 0.2359	0.96293

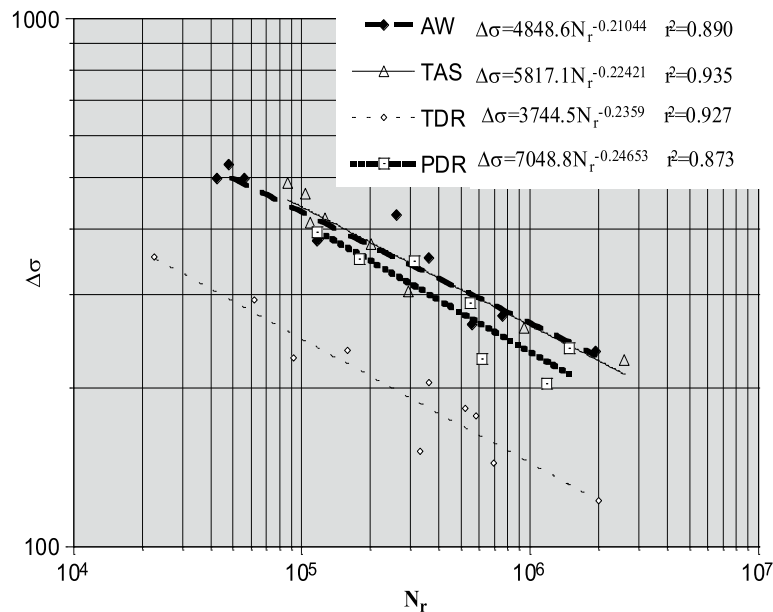


Fig. 5 Curvas S-N médias dos provetes das quatro séries ensaiadas.

Os provetes fracturados romperam pelo pé do cordão. O ensaio correspondente ao provete TAS 8 foi interrompido com  $2,6 \times 10^6$  ciclos sem que tenha ocorrido rotura.

Das curvas S-N representadas na figura ressaltam os seguintes factos:

- Embora o raio médio de concordância do pé dos cordões das juntas dos provetes da série TAS seja cerca de 30% superior ao da série AW, a passagem suplementar de refusão TIG não conduz a melhorias significativas no comportamento à fadiga;
- Os provetes da série TDR apresentam uma vida muito inferior aos da série AW, pelo que o tratamento de refusão TIG não parece alterar significativamente o comportamento à fadiga dos provetes pré-fissurados;
- Embora os resultados disponíveis para os provetes da série PDR indiquem raios de concordância do pé dos cordões das juntas soldadas bastante inferiores aos da série AW, e apesar da maioria dos provetes da série PDR apresentar pré-fissuras não reparadas, verifica-se que os provetes após reparação têm uma vida próxima da dos provetes como soldados.

A microestrutura apresentada, característica dos cordões de refusão TIG e plasma poderá ser responsável por uma distribuição de tensões residuais que contribua para a explicação dos resultados apresentados. Encontra-se em preparação a realização de ensaios de determinação de tensões residuais para testar esta hipótese.

#### 4. CONCLUSÕES

- A passagem suplementar TIG aumenta significativamente o raio de concordância do pé dos cordões das juntas soldadas, mas neste estudo não conduziu a qualquer melhoria no comportamento à fadiga;
- As fendas prévias existentes nos provetes sujeitos a reparação, séries TDR e PDR, revelaram-se demasiado profundas, pelo que os tratamentos de refusão efectuados foram insuficientes para promover a sua reparação integral;

- Apesar de existirem fendas não reparadas e grande porosidade no cordão de refusão plasma, estas juntas apresentam um bom comportamento à fadiga.

## REFERÊNCIAS

- [1] Branco, C.M., Fernandes, A.A., Castro, P.T., “Fadiga de Estruturas Soldadas”, Cap. 11, Ed. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.
- [2] Maddox, S.J., “Fatigue Strength of Welded Structures”, Ed. Abington Publishing, Cambridge, U.K., 1991
- [3] Huther, I., Lieurade, Souissi, R., Nussbaumer, A., Chabrolin, B., Janosch, J.J., “Analysis of Results on Improved Welded Joints”, Welding in the World, Vol. 37, N.º5, pp.242-266, 1996
- [4] “British Standard Specifications for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels”, BS5500, 1990
- [5] Offshore Instalations; Guidance on Design, Construction and certification, UK Department of Energy, HMSO, Fourth Edition,, 1990
- [6] Branco, C.M., Relatório de Progresso – 1998, “Estudo do comportamento de juntas soldadas submetidas a tratamento de reabilitação”, Projecto PRAXIS XXI 3/3.1/CEG/2705/95
- [7] Nyurioka, Okumura, M., Kasuya, T., Cotton, H.J.U., “Prediction of HAZ Hardness of Transformable Steels”, Metal Constructions, pp.217R-223R, April 1987