

INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DO METAL DEPOSITADO NA TENACIDADE DA ZONA AFECTADA PELO CALOR DE SOLDADURAS NUM AÇO TEMPERADO E REVENIDO

Carlos A. S. Soares e Altino J. R. Loureiro
Dep. Eng^a Mecânica - UNIVERSIDADE DE COIMBRA
Pólo II - Pinhal de Marrocos - 3030 COIMBRA

RESUMO

O objectivo do presente trabalho foi o estudo da tenacidade da zona afectada pelo calor (ZAC) de soldaduras realizadas num aço estrutural microligado C-Mn temperado e revenido e avaliar a influência das propriedades mecânicas do metal depositado sobre a referida tenacidade.

Para o efeito foram utilizadas chapas de aço RQT 501 (British Steel Corporation), com 25 mm de espessura soldadas pelo processo de arco submerso com uma energia específica de 2,5 kJ/mm e com três pares fluxo/arame de soldadura diferentes. Com estes três pares pretendeu-se obter metais depositados com resistência mecânica respectivamente inferior, semelhante e superior à do material de base.

Das placas soldadas foram retirados provetes para ensaios de flexão em três pontos COD, com a orientação T-L. Nestes provetes foi introduzida uma fenda de fadiga na ZAC, junto à linha de fusão. Os ensaios foram realizados a temperaturas compreendidas entre -85 °C e +20 °C.

Os resultados dos ensaios mostram que, para igual temperatura e energia específica adicionada, a tenacidade da ZAC é mais elevada para as soldaduras realizadas com materiais depositados mais resistentes e tenazes.

ABSTRACT

The aim of this work was to study the HAZ toughness of welded Q&T C-Mn steel structures and to assess the influence of the mechanical behaviour of weld metal over its toughness.

Bead-on-plates welds were deposited on 25 mm in thickness plates of a Q&T steel RQT 501 by SAW with 2,5 kJ/mm heat input. To get an overview of weld metal mismatch behaviour three flux/wire combinations were tested.

Three-point-bending COD specimens were obtained from coupon plates. These specimens were notched in HAZ, near of the fusion line. The test temperatures were chosen between -85 °C and +20 °C.

Test results show that, at the same temperatures and with the same heat input, HAZ toughness is greater for overmatching weld metals.

1. INTRODUÇÃO

Até à década de 40, o projecto de construções soldadas, bem como o controlo de qualidade dos materiais e dos processos e procedimentos de soldadura utilizados, assentava, fundamentalmente, nas respectivas tensão de rotura e ductilidade. Os metais de adição caracterizavam-se sempre por produzir depósitos com resistência mecânica superior à do material de base (MB) [1].

A ocorrência de vários acidentes resultantes de fracturas frágeis, alguns dos quais com consequências catastróficas, levou a que os critérios até então utilizados na realização e controlo das soldaduras fossem revistos. As investigações efectuadas permitiram concluir que, nas construções soldadas, a tenacidade das soldaduras, principalmente na zona afectada pelo calor (ZAC) era inferior à do MB. Concluiu-se ainda que, para temperaturas negativas,

esta tenacidade poderia tomar valores perigosamente baixos [1,2].

A partir dessa época, a selecção dos aços e dos materiais de adição das soldaduras, bem como o estudo do comportamento mecânico em serviço das estruturas soldadas, passaram a contar com a realização de ensaios de tenacidade. Entre estes têm-se destacado os ensaios Charpy e COD (Crack Opening Displacement) [1, 2].

A partir da década de 60, as construções nas quais a diminuição do peso se tornou importante e em que as temperaturas de serviço podem ser muito baixas, como são exemplo as estruturas offshore, passaram a ser construídas maioritariamente em aços estruturais de média e alta resistência, entre os quais se destacam os aços microligados C-Mn [1, 3, 4].

Estes aços não permitiram, só por si, resolver o problema das baixas tenacidades da ZAC anteriormente referidas. Além disso, da sua utilização resulta que nem sempre é viável a utilização de materiais de adição que criem depósitos mais resistentes que o MB, como sempre foi regra com a utilização dos aços tradicionais [1]. Por outro lado, de acordo com investigações mais recentes [5, 6], um grau de resistência mecânica do metal depositado muito superior à do MB pode originar uma redução acentuada da tenacidade da ZAC.

O interesse deste estudo resulta, portanto, da baixa tenacidade que, frequentemente, tem caracterizado as soldaduras, não apenas dos antigos, mas também dos modernos aços estruturais, principalmente na ZAC, e de os respectivos valores poderem tornar-se muito baixos para temperaturas de serviço negativas.

A ocorrência de defeitos nas juntas soldadas, não apenas na ZF mas também na ZAC, constitui um outro problema que sempre se verificou na construção soldada [1].

Mesmo com boas condições de construção, e embora os ensaios não destrutivos permitam, detectar, em larga medida, a existência de defeitos, a sua formação é difícil de evitar em absoluto e a sua remoção torna-se dispendiosa. Por esses motivos, os critérios de aceitabilidade, tendo em conta as características e a sua influência na segurança das construções, baseiam-se, em larga medida, no desenvolvimento que tem tido a Mecânica da Fractura [1, 7].

No presente trabalho pretende-se avaliar em que medida a resistência do material depositado pode influenciar a tenacidade da ZAC da soldadura de um aço C-Mn microligado temperado e revenido. Para o

efeito foram utilizados três pares fluxo/aramé de soldadura a que correspondem depósitos de metal cujas resistências se pretenderam, respectivamente, inferior, semelhante e superior à do MB.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

2.1. Material de base e de adição

Foram utilizados três pares de chapas de aço C-Mn microligado temperado e revenido, RQT 501 (British Steel Corporation). As peças de cada um dos pares foram ligadas entre si, topo-a-topo, por soldaduras multipasse, pelo processo de arco submerso, com uma energia térmica específica de 2,5 kJ/mm.

A composição química e as dimensões das chapas utilizadas, bem como a respectiva preparação de junta, são indicadas no quadro 1 e na figura 1.

A realização das soldaduras por arco submerso foi antecedida pela execução de passes de raiz pelo processo eléctrodo revestido, com a utilização de eléctrodos AWS/SFA A5.1: E7018.

Pretendeu-se, deste modo, obter um suporte para o fluxo do arco submerso e, ao mesmo tempo, garantir uma boa penetração dos respectivos passes.

Cada soldadura foi executada em cinco ou seis camadas por arco submerso, com um dos três pares fluxo/aramé de soldadura seguintes:

- AWS A5.17-80: F7 A4-EL12 ;
- AWS A5.23-80: F9 A10-(EA2) ;
- AWS A5.23-80: F8 A10-ENi2 .

Os parâmetros de soldadura utilizados em todos os casos foram os seguintes: 550 A; 30 V; 24 m/h.

Quadro 1 - Composição química e dimensões das placas do material de base

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al
%	0,103	0,243	1,065	0,013	0,012	0,019	0,155	<0,008	<0,051	0,033

Dimensões das chapas utilizadas

1000×150×25 [mm]

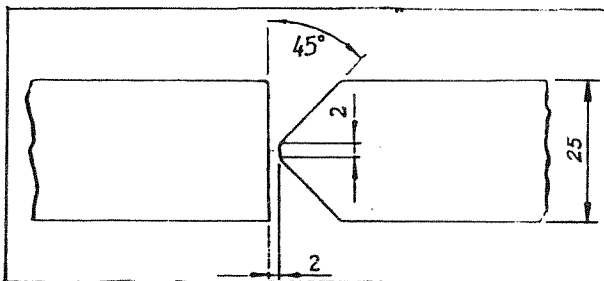
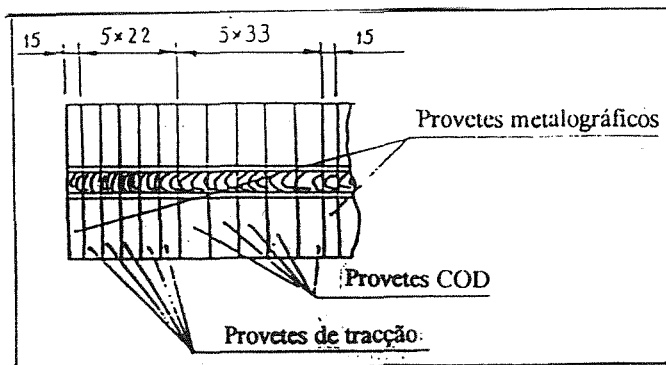


Fig. 1 Preparação da junta

2.2. Extracção dos provetes

Foram retirados, de cada uma das placas obtidas, provetes metalográficos, de tracção e COD, segundo o esquema da figura 2.

Relativamente aos provetes metalográficos e de tracção, o trabalho realizado sobre eles, bem como os respectivos resultados, foram já anteriormente apresentados [8]. Os provetes metalográficos foram também utilizados para determinação da composição química da ZF por espectrometria de massa.



Os provetes COD foram extraídos, preparados e ensaiados de acordo com a norma BS 5762 [9], com a orientação T-L, tendo ficado, tal como se indica na figura 3, com as dimensões 23×23×250 [mm]. Procurou-se localizar o entalhe, bem como a respectiva fenda de fadiga, na ZAC, do lado do bordo da junta que não fora previamente chanfrado, junto à linha de fusão.

Fig. 2 - Esquema de corte das placas para extracção dos provetes

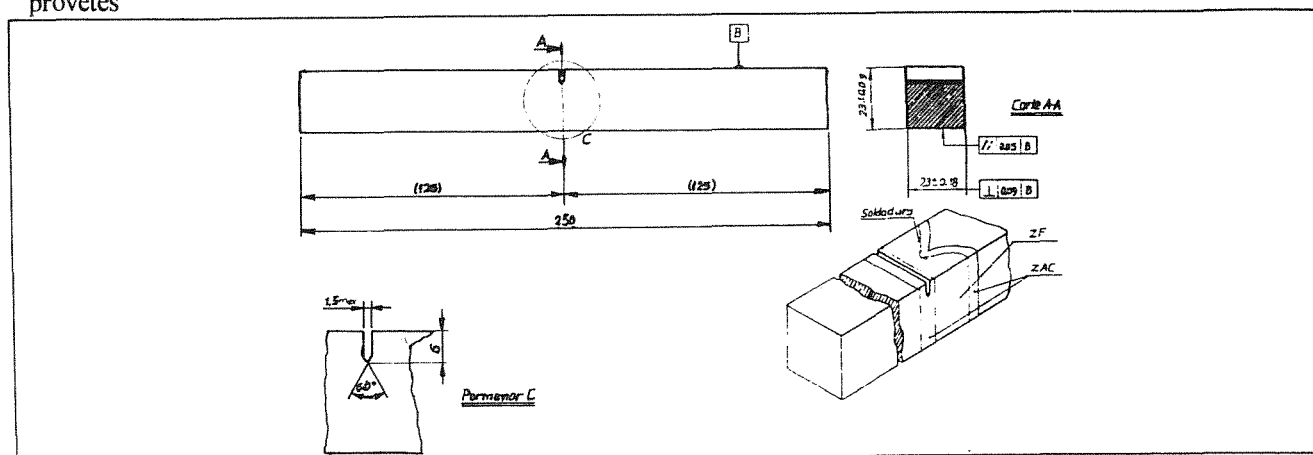


Fig. 3 - Provette COD

2.3. Composição química e resistência mecânica das soldaduras

No quadro 2 está indicada a composição química da ZF de cada uma das soldaduras.

O quadro 3 indica a tensão limite de elasticidade e a tensão normal na força máxima de acordo com a norma NP EN 10 002-1 [10].

Quadro 2 - Composição química da ZF das soldaduras

ZF da soldadura obtida com o par fluxo/arame de soldadura AWS A5.17-80:F7 A4- EL12 (referência RQT-51)													
Ele ^o	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Al	Mg	Zn
%	0,070	0,387	1,457	0,060	0,028	0,021	0,053	0,029	0,045	0,019	0,013	0,009	0,044
ZF da soldadura obtida com o par fluxo/arame de soldadura AWS A5.23-80:F9 A10- (EA2) (referência RQT-52)													
Ele ^o	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Al	Mg	Zn
%	0,080	0,266	0,968	0,055	0,016	0,032	0,450	0,036	<0,03	0,023	0,014	0,009	0,009
ZF da soldadura obtida com o par fluxo/arame de soldadura AWS A5.23-80:F8 A10- ENi2 (referência RQT-52)													
Ele ^o	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Al	Mg	Zn
%	0,045	0,303	1,277	0,050	0,018	0,384	0,433	1,084	0,067	0,025	0,015	0,013	0,004

Quadro 3 - Valores da tensão limite de elasticidade e da tensão normal na força máxima das soldaduras e do material de base

Referência	Zona	$R_{e,0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]
RQT-51	ZF	510	566
	ZAC	448	560
RQT-52	ZF	540	645
	ZAC	477	593
RQT-53	ZF	634	798
	ZAC	441	569
RQT501	MB	449	564

Símbolos de acordo com a norma NP EN 10 002-1 (1990)

R_e - Tensão limite de elasticidade

R_m - Tensão na força máxima

2.4. Realização dos ensaios

Os ensaios COD foram efectuados de acordo com o estabelecido pela norma BS 5762 para a flexão em três pontos.

Antecedendo a realização dos ensaios, foi produzida, em cada provete e na continuação do respectivo entalhe, uma fenda de fadiga tendo, para o efeito, sido utilizada uma máquina de fadiga por flexão plana equipada com uma célula de carga e uma ponte dinâmica VISHAY, modelo 2100. O avanço da fenda foi controlado com auxílio de uma luneta óptica, montada sobre um suporte regulável, e de um comparador com precisão de 0,01 mm.

Os ensaios foram realizados por meio de uma máquina INSTRON, modelo 4206, computadorizada e dispo de software e de acessórios específicos, a temperaturas compreendidas entre -85°C e +20 °C.

As temperaturas de ensaio inferiores a +20 °C foram obtidas por meio de uma mistura de álcool etílico e azoto líquido em partes convenientes, depositada numa tina de aço inox adaptada às amarras da máquina. Tornou-se possível, deste modo, manter o provete imerso nesta solução e à respectiva temperatura, durante a realização do ensaio, mantendo-se fora do líquido o extensómetro montado para medição dos deslocamentos das extremidades do entalhe. O controlo da temperatura do líquido fez-se com auxílio de um termopar tipo k.

Após o ensaio, alguns provetes foram cortados longitudinalmente, polidos e contrastados quimicamente, a fim de identificar as zonas e correspondentes microestruturas em que se deu a propagação das fendas, e analisar eventuais defeitos presentes.

Foi também feita a análise da aceitabilidade das fendas de fadiga de acordo com a norma BS 5762.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios COD estão indicados no quadro 4 e na figura 4.

Considerando como valor de comparação o COD mínimo de 0,25 mm a -10 °C, imposto correntemente nas condições de projecto de estruturas offshore [3], é de referir a existência, nas três soldaduras, de alguns resultados cujos valores são inferiores a 0,1 mm a temperaturas próximas de -10 °C. Observa-se também, em contrapartida, valores de tenacidade COD significativamente superiores a 0,25 mm mesmo a algumas dezenas de graus negativos. Da observação da figura 4 ressalta a elevada tenacidade obtida em vários provetes da soldadura RQT-53, com valores superiores a 0,5 mm a temperaturas que chegam a -60 °C.

Embora a dispersão dos resultados obtidos nas três soldaduras seja relativamente acentuada, as curvas representativas da tendência estatística de distribuição das tenacidades com a temperatura levam a crer que a soldadura realizada com material depositado mais resistente e tenaz (soldadura RQT-53) apresenta melhor tenacidade a baixas temperaturas.

Ainda em relação à grande dispersão de valores de COD obtidos, importa ter em consideração os aspectos microestruturais que determinam a tenacidade na zona ou zonas em que a fenda de fadiga se iniciou e propagou, bem como a sua distância e orientação relativamente à linha de fusão [11].

Interessa ainda avaliar a presença e a dimensão de eventuais defeitos na região de propagação da fenda de fadiga ou na região de fractura frágil dos provetes.

Quadro 4 - Resultados dos endaios COD

Referência do provete	Temperatura [°C]	Relação a/w [mm/mm]	COD [mm]	Tipo
RQT-51	-80	0,525	0,092	δu
	-38	0,530	0,210	δu
	-30	0,560	0,419	δm
	-28	0,500	0,384	δm
	-10	0,570	0,355	δm
	+20	0,540	0,348	δm
RQT-52	-82	0,540	0,051	δc
	-81	0,570	0,185	δu
	-75	0,520	0,296	δu
	-63	0,530	0,317	δu
	-50	0,530	0,461	δu
	-44	0,520	0,504	δm
	-40	0,510	0,450	δu
	-35	0,510	0,151	δu
	-28	0,560	0,445	δm
	-23	0,540	0,196	δu
	-14	0,520	0,082	δc
	+20	0,610	0,281	δm
	+20	0,540	0,487	δm
	+20	0,500	0,506	δm
RQT-53	-86	0,510	0,044	δc
	-80	0,500	0,204	δu
	-72	0,680	0,213	δu
	-58	0,530	0,554	δm
	-47	0,540	0,469	δu
	-40	0,540	0,156	δu
	-37	0,530	0,535	δm
	-33	0,550	0,390	δu
	-30	0,590	0,184	δu
	-20	0,560	0,501	δm
	-13	0,520	0,474	δm
	-7	0,520	0,157	δu
	+20	0,560	0,417	δm
	+20	0,520	0,335	δu

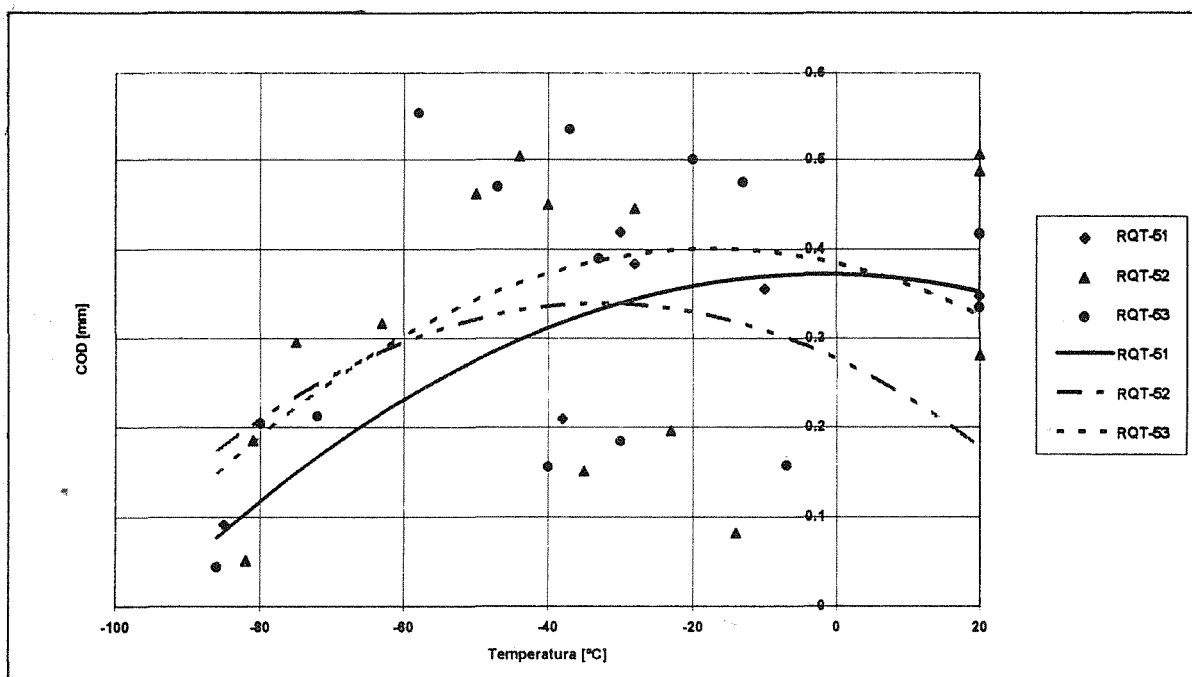


Fig. 4 - Tenacidade COD na ZAC das soldaduras RQT-51, RQT-52 e RQT-53 realizadas no aço RQT 501

A avaliação da relação a/w , a qual determina o factor Y [9] influenciando portanto o factor de intensidade de tensões, embora conduza a uma variação relativamente significativa, parece não ser aqui determinante na variação de δ . Por tudo isto, as variações de δ , além de dependerem da temperatura, dependem também, provavelmente, da microestrutura e de eventuais defeitos. A este propósito é de referir as conclusões a que chegaram Burget e Memhard [12], segundo os quais os efeitos do valor da tensão de cedência do metal depositado, comparativamente ao MB, sobre o comportamento global e localizado da junta dependem da geometria, do tamanho de defeito, do tipo de carga e das condições de constrangimento

A propósito das microestruturas em que a fenda de fadiga se propagou, em cada provete, é de referir que, embora o entalhe e a fenda de fadiga correspondentes tenham sido produzidos no lado da junta de soldadura relativamente ao qual o respectivo bordo não havia sido chanfrado, a propagação da ZF sobre o MB é sempre maior à superfície da peça do que em profundidade. Deste modo, a ZAC apresenta-se também com o respectivo contorno não perpendicular à superfície da chapa soldada. Como, por outro lado, a largura da ZAC é bastante pequena em relação à espessura da chapa, dificilmente a fenda de fadiga poderá propagar-se sem encontrar várias microestruturas da ZAC bem como outras zonas da soldadura, o que dificulta bastante a interpretação dos resultados. Estes aspectos foram também já anteriormente referidos por Thaulow e Paauw [11].

Relativamente ao quadro 4, verifica-se que nele constam diversos δ_c . Estes correspondem a outros tantos pop-ins, os quais resultam, por sua vez, da existência de zonas frágeis localizadas, situadas ao longo do caminho de propagação da fenda durante os ensaios COD.

4. CONCLUSÕES

Os resultados dos ensaios de tenacidade visando testar a ZAC das três soldaduras permitem retirar as seguintes conclusões:

- 1) As três soldaduras apresentam, a baixas temperaturas, tenacidades na ZAC que tendem a ser superiores aos valores mínimos que são, geralmente, exigidos nas estruturas offshore;
- 2) A baixa taxa de energia térmica específica das três soldaduras, ao limitar o crescimento do grão, principalmente junto à linha de fusão, melhorou significativamente a tenacidade da ZAC;
- 3) A tenacidade da ZAC é mais elevada para soldaduras realizadas com material depositado mais resistente e tenaz;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração prestada pelo Cranfield Institute of Technology, a quem se deve o fornecimento do material de base utilizado, e pela Firma ESAB, a qual forneceu os materiais de adição.

6. REFERÊNCIAS

- [1] - Denys, R., Mis-Matching of Welds, ESIS 17 (Edited by K.-H. Schwalbe and M. Koçak) 1994, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 59 - 102.
- [2] Loureiro, A., "Estudo da Tenacidade na ZAC de Soldaduras em Aços Estruturais de Alta Resistência Temperados e Revenidos", Dissertação para Doutoramento em Ciências de Engenharia - Tecnologia de Produção, Coimbra, 1991.
- [3] Webster, S.; Walker, E., 7th. I. C. Offshore Mech. and Arctic Engineering, Houston, 1988, pp.395-403.
- [4] Branco, C.; Fernandes, A.; Castro, P., "Fadiga de Estruturas Soldadas", Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986.
- [5] Gordon, J.; Wang, Y., Mis-Matching of Welds, ESIS 17 (Edited by K.-H. Schwalbe and M. Koçak) 1994, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 351 -368.
- [6] Toyoda, M.; Minami, F.; Ruggieri, C.; Thaulow, C.; Hauge, M., Mis-Matching of Welds, ESIS 17 (Edited by K. -H. Schwalbe and M. Koçak) 1994, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 399-415.
- [7] Tang, W.; Shi, Y., Mis-Matching of Welds, ESIS 17 (Edited by K. -H. Schwalbe and M. Koçak) 1994, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 433-443.
- [8] Soares, C.; Loureiro, A., Ligações Entre Materiais, Anais do 7º Enc. ontro Nacional da Sociedade Portuguesa de Materiais, Dep. Engª. Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro, 1995, 2º vol, pp. 26-34.
- [9] BS 5762, "Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing", BSI, 1979; Amendment No. 1, 31 December 1982.
- [10] NP EN 10 002-1, "Materiais Metálicos. Ensaio de Tracção. Parte 1: Método de Ensaio (à temperatura ambiente)", IPQ, Novembro de 1990.
- [11] Thaulow, C.; Paauw, A., 7th. I. C. Offshore Mech. and Arctic Engineering, Houston, 1988, pp.275-286.
- [12] Burget, W.; Memhard, D., Mis-Matching of Welds, ESIS 17 (Edited by K. -H. Schwalbe and M. Koçak) 1994, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 485-510.