



TENACIDADE DO AÇO ABNT 4137 H AVALIADA PELA MECÂNICA DA FRATURA ELASTO-PLÁSTICA



ACIRES DIAS
EDISON DA ROSA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA — UFSC

SUMÁRIO

Usando os conceitos do integral J, do deslocamento de abertura da trinca, do método de Dowling e Townley, a tenacidade foi avaliada no patamar superior do aço ABNT 4137. Foram realizados inúmeros ensaios, com corpos de prova CT e de flexão em três pontos, para temperaturas de revenido de 400°C e 500°C. Os resultados experimentais ao serem avaliados pelos diferentes métodos apresentaram uma concordância razoável.

INTRODUÇÃO

O estudo da tenacidade do aço ABNT 4137 H, foi motivado devido ser este um aço de ampla utilização comercial. Dentre os vários métodos que abordam a Mecânica da Fratura Elasto Plástica (MFEL), selecionou-se os métodos da integral J, do Deslocamento de Abertura da Trinca (COD) e de Dowling e Townley, por entender-se serem estes os mais abrangentes. Trabalhou-se com os corpos de prova de tipo compacto (CT) e de flexão em três pontos [2] temperados, e revenidos a 400°C e 500°C.

Os estudos desenvolvidos pela Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) levam a um parâmetro que caracteriza o campo de tensões na extremidade da trinca. A determinação deste parâmetro torna-se um pouco limitado dentro da MFEL, devido a diversos efeitos que podem ser gerados por temperatura, dimensões, tratamento térmico, solda entre outros. Estes efeitos normalmente provocam uma plastificação no extremo da descontinuidade limitando o uso da MFEL. O estudo desta plastificação é o ponto fundamental na Mecânica da Fratura. O objetivo final é poder representar o campo de tensões no extremo da trinca, por um parâmetro caracterizador deste campo, de forma que venha a ser função das dimensões da estrutura, das propriedades do material e do carregamento aplicado.

MÉTODOS DE ANÁLISE DA MFEL

Integral J. Rice [7] definiu a integral J, para um material homogêneo elástico, linear ou não linear, livre de forças internas e sujeito a um campo de deformação bidimensional no plano x,y (para o estado plano de deformações (EPD), estado plano de tensões (EPT) ou anti-plano de deformações), como sendo uma integral de linha ao longo de uma curva em torno da extremidade de um entalhe, sendo representado matematicamente por,

$$J = \int (w dy - \vec{T} \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

onde \vec{T} é o vetor tensão, perpendicular a Γ , tomado para fora da curva, u o vetor deslocamento, ds um elemento de arco ao longo de Γ , w é a função densidade de energia, e Γ a curva que inicia-se na parte inferior do entalhe e segue contornando a trinca no sentido anti-horário até atingir a superfície superior do entalhe.

Se o contorno for feito coincidente com o extremo do entalhe, desde que este não seja agudo, pode-se tornar a integral J dependente somente do campo local de deformações. Se estiver sobre a extremidade do entalhe ($\Gamma = \Gamma_t$), tem-se $\vec{T} = 0$, dado que a superfície livre no entalhe não está carregada. Assim,

$$J = \int_{\Gamma_t} w dy \quad (2)$$

de forma que J representa uma medida da deformação no extremo do entalhe [7]. Por isso, pode-se usar a integral J na Mecânica da Fratura Elástica Não Linear, e ainda como um parâmetro caracterizador da singularidade na raiz da trinca, tal como acontece com o fator de intensidade de tensões na MFEL, K_I .

Para $\Gamma = \Gamma_t$, a integral J se identifica com a taxa de liberação de energia G, para um corpo elástico linear, que num estado plano de tensão (EPT), é representado por,

$$J_I = G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (3)$$

e para o estado plano de deformações (EPD),

$$J_{IC} = G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} (1-\nu) \quad (4)$$

sendo E o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson [1],[5].

Deslocamento de Abertura da Trinca (COD). O COD é um método da Mecânica da Fratura, cuja aplicação pode se dar em situações em que a MFEL for superada. Com a presença da zona plástica no extremo da trinca, haverá um movimento de separação das faces, ocorrendo aumento da abertura do fundo do entalhe, sem que haja propagação do seu comprimento. Este movimento é representado por COD ou δ .

O valor do COD é estimado a partir dos testes experimentais, utilizando-se um extensômetro montado no corpo de prova [2],[5]. A leitura do deslocamento das lâminas do extensômetro, V_g , se dá continuamente, sendo registrado num gráfico carga-deslocamento. O COD causado pela plastificação sob carga estática é calculado a partir de V_g , usando o modelo de trinca de Dugdale-Barenblat [5].

Método de Dowling e Townley. Dowling e Townley [1],[4] desenvolveram um processo de previsão de falhas de elementos estruturais, contendo ou não defeitos, cuja análise pode ser aplicada sobre um estado de fratura totalmente frágil, dentro da MFEL, ou sobre um estado de falha com uma plastificação generalizada no material. Com base na equação que fornece a tensão de falha da estrutura desenvolvida por Heal, Spink e Worthington, propuseram um trabalho final que resultou

no desenvolvimento de um diagrama de previsão de falhas. Os pontos críticos deste diagrama são definidos na ordenada por uma relação entre o fator de intensidade de tensão e a tenacidade de fratura no EPD, baseados nos princípios do MFEL, e na abscissa pela relação entre a carga aplicada e a carga de colapso, segundo a análise limite. Para maior facilidade na utilização deste diagrama, Dowling e Townley plotaram na ordenada uma relação entre a carga de falha real L_f e a carga de falha prevista pela MFEL L_k , e na abscissa uma relação entre L_f e a carga de falha prevista pela análise limite L_u [1], [4], tal que,

$$\frac{L_f}{L_k} = \frac{L_f}{L_u} \frac{8}{\pi^2} \left[\ln \left(\sec \frac{\pi}{2} \frac{L_f}{L_u} \right) \right]^2 \quad (5)$$

CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DO AÇO ABNT 4137 H E CONDIÇÕES DE ENSAIO.

Os resultados práticos aqui obtidos tem por objetivo, também auxiliar no dimensionamento e previsão de falha de estruturas, razão pelo qual escolheu-se um aço tipo comercial, ABNT 4137 H, laminado, de larga aplicação em diferentes componentes da indústria mecânica.

Os corpos de prova foram temperados a 850°C, com resfriamento em óleo, sendo que optou-se pelo revenimento a 400°C e 500°C devido ter-se comprovado experimentalmente que nesta faixa de revenimento, o aço apresentava as melhores características de resistência e tenacidade. As características mecânicas foram levantadas sobre corpos de prova de tração simples. Obteve-se experimentalmente através de corpos de prova Charpy, em saídas a temperaturas que variaram de -80°C até 40°C, a curva de energia no ensaio de impacto. A zona de transição ficou perfeitamente definido entre -20°C e 0°C. A energia no patamar inferior permaneceu praticamente constante, em torno de 34 Joules, até a temperatura de -30°C, enquanto que para o patamar superior ela estabilizou a partir de 10°C, em 98 Joules.

A análise micrográfica do material mostrou que a estrutura do aço ABNT 4137 H, temperado e revenido, é constituído basicamente de martensítica revenido, notando-se uma estrutura tipicamente acicular [5].

Os corpos de prova sofreram entalhamento perpendicular ao sentido de laminação, uns com raio finito no fundo do entalhe e outros com fissuramento por fadiga obtido a partir de um entalhe inicial [2], [3]. O comprimento de fissura e as cargas máximas e mínimas aplicadas para a propagação da trinca por fadiga, seguiram recomendações do ASTM E 399 [2], enquanto a frequência de carregamento esteve em torno de 10 ciclos por segundo. Através do processo de eletro-erosão, obteve-se para os corpos de prova não fadigados, um raio no fundo do entalhe de 0,2 mm.

Os corpos de prova do tipo CT e flexão em três pontos, foram ensaiados na máquina MTS-810, com capacidade para 100 kN, a temperatura ambiente de 25°C. A velocidade de deslocamento do êmbolo foi 0,001 mm/seg.

A capacidade de carga da máquina de ensaio MTS-810 limitou as dimensões dos corpos de prova CT e deflexão em três pontos. Estas foram obtidas a partir das características mecânicas do aço estudado e pelo método de Dowling e Townley, obedecendo os seguintes critérios iniciais: uma primeira série com B e W constantes e a/W variáveis, uma segunda série com a/W constantes e B variável e uma terceira série com W constante e B e a/W variáveis [5], sendo B a espessura do espécime, W a altura e a o comprimento da trinca. Algumas limitações na obtenção dos corpos de prova e nos ensaios, alteraram um pouco os lotes de corpos de prova em relação aos critérios iniciais. Nas tabelas 1 e 2 estão as principais dimensões dos corpos de prova CT e de flexão respectivamente.

As medições do deslocamento de abertura da trinca (COD) foram obtidas com auxílio do extensômetro modelo 63203C - 20 MTS, série 312, instalados no espécime conforme recomendações da ASTM E 399 [2]. A história

do comportamento do corpo de prova à solicitação, foi assim obtida: no registrador da MTS a curva carga-deslocamento de abertura da trinca (FxVg) e num registrador auxiliar a curva carga deslocamento da célula de carga (FxΔ), como mostra a figura-1, para os espécimes do tipo CT e flexão em três pontos.

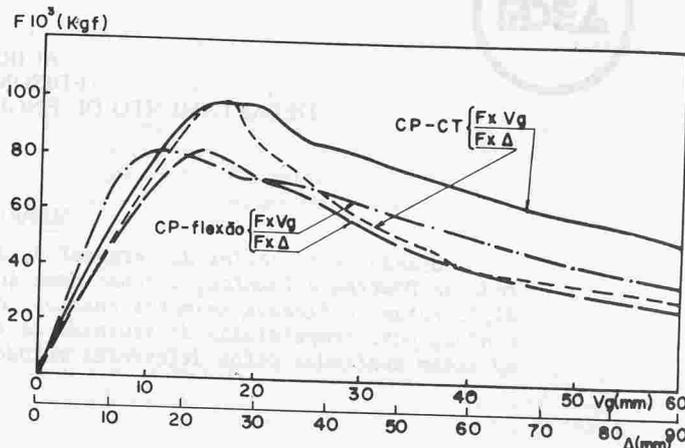


Figura-1. Curvas carga-deslocamento de abertura do extensômetro (FxVg) e carga-deslocamento do ponto de aplicação da carga (FxΔ), para corpo de prova (CP) do tipo CT nº 21, e flexão nº 22, revenidos a 500°C.

Para se obter a história do ensaio de forma mais completa, fez-se simultaneamente aos gráficos, fotografias que registraram o comportamento do espécime à solicitação, e em alguns casos, foi possível fotografar o avanço da zona plástica na frente da trinca [5].

CÁLCULO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.

A partir dos critérios de análise fornecidos pelos métodos desenvolvidos, confrontar-se-á os resultados dos ensaios executados sobre os corpos de prova. Como os espécimes do mesmo tipo, apresentaram resultados experimentais próximos entre si, foi considerado a média dos valores obtidos experimentalmente como base para os cálculos.

Não foi possível determinar a carga de fratura, ou seja o instante em que iniciava a propagação da trinca. Isto ocorreu em virtude do pequeno número de corpos de prova disponíveis para o ensaio, impossibilitando a realização da quantidade de ensaios necessários, para a identificação deste instante. Este fato limitou a obtenção de J_c , δ_c bem como K_{Ic} .

Integral J. A partir das curvas FxVg e FxΔ obtidas experimentalmente (fig.-1) foi levantada as curvas de F/BxJ para os corpos de prova CT e deflexão, respectivamente figuras 2 e 3. Na determinação da integral J, considerou-se para os espécimes compactos, os deslocamentos elásticos Δ_e e plásticos Δ_p separadamente, enquanto para os espécimes de flexão o cálculo foi feito a partir do deslocamento total $\Delta = \Delta_e + \Delta_p$ [5]. Estas curvas fornecem os valores de J para diversos níveis de carregamento. No ponto de carga máxima obtém-se $J_{máx.}$, que relacionado com as equações 3 e 4, nos respectivos estados de fratura, estima-se o fator de intensidade de tensões K_{Ij} , indicados nas tabelas 1 e 2.

Para os corpos de prova revenido a 500°C a carga tende a um ponto máximo muito lentamente, (fig.-1) devido ao deslocamento acentuado, influenciando sobremaneira o valor de $J_{máx.}$ e da tenacidade correspondente. Para os revenidos a 400°C, o aumento de $J_{máx.}$ se dá diretamente proporcional a $F_{máx.}$.

Deslocamento de Abertura da Trinca - COD. Os valores de δ para carga máxima são apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Nas curvas do COD x Δ (deslocamento do ponto de aplicação da carga) para corpos de prova de flexão, revenido a 400°C (fig.-4) com a/w=0,5, vê-se que Δ tem de ser aumentado consideravelmente para um mesmo δ .

quando se varia a espessura dos corpos de prova de 12 mm até 30 mm. Nos espécimes de flexão revenidos a 500°C, considerando-se $B=12$ mm, $w=2.B$ e variando a/w observa-se que quanto menor for a/w menor deverá ser o deslocamento do ponto de aplicação da carga, para causar o mesmo COD. Este comportamento também ocorre com os espécimes CT, ambos representados na figura 5. Para outro conjunto de corpos de prova de flexão apresentados na figura 6 nota-se que a/w é marcante no comportamento de $\delta \times \Delta$, podendo porém, ser desprezíveis as influências de espessura B e altura w , na determinação do COD. [5]

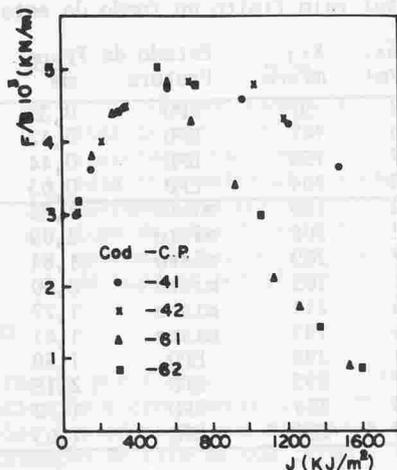


Figura-2. Curva $F/B \times J$ para corpos de prova tipo CT, com $B=6,1$ e $a/w=0,5$, revenidos a 500°C.

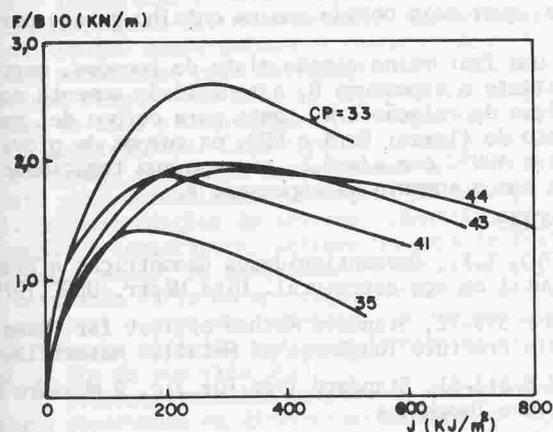


Figura-3. Curva $F/B \times J$ para corpos de prova de flexão, $w=24$ mm, $a/w=0,5$ e B variável, revenido a 500°C.

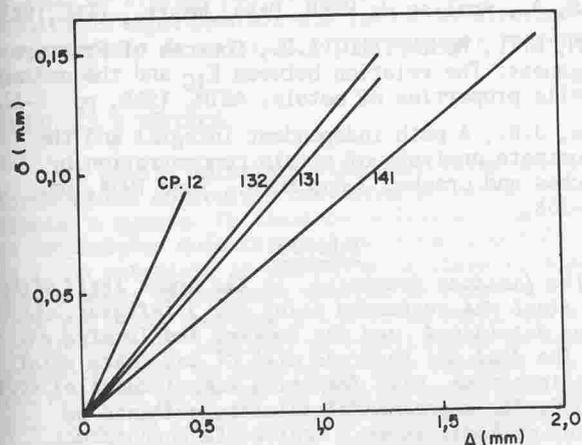


Figura-4. Curvas deslocamento de abertura de trinca (δ) x deslocamento do ponto de aplicação da carga (Δ). CP flexão, revenido 400°C e $a/w=0,5$.

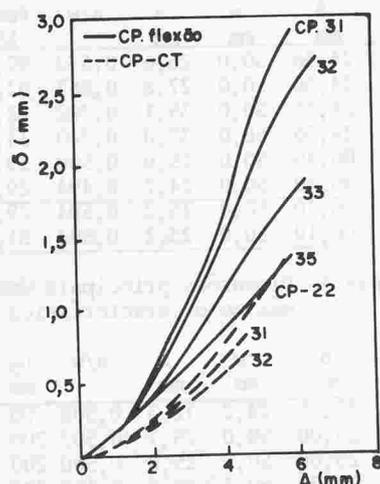


Figura-5. CP flexão, $B=12$ mm, CP tipo CT, $B=24,4$ mm ambos com a/w variável, revenido a 500°C.

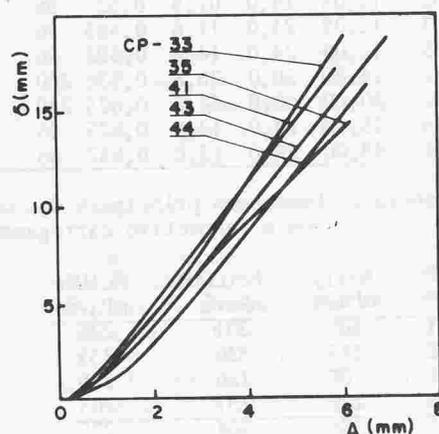


Figura-6. COD x Δ , para CP de flexão com $w=24,4$ mm, $a/w=0,5$ e B variável.

Método de Dowling e Townley. O fator de intensidade de tensões pelo método de Dowling e Townley ($K_C(DT)$), foi também obtido para carga máxima. Com ele e mais as características geométricas e de fratura dos corpos de prova identificou-se o estado de fratura, EPD, EPT ou misto. (tab. 1 e 2) [4],[5],[6].

Observou-se que os corpos de prova revenidos a 400°C, tiveram a carga de falha real muito próxima da carga de falha prevista pela MFEL, como o esperado. Para os espécimes revenidos a 500°C, tanto CT quanto de flexão, houve uma variação ora para a MFEL, ora para a carga de falha prevista pela Análise Limite, com maior predominância desta última.

Nas tabelas 3 e 4 faz-se uma comparação dos valores do fator de intensidade de tensões calculado a partir da carga máxima, entre os métodos da integral J , do COD e Dowling e Townley para os corpos de prova CT e de flexão em três pontos. Os três métodos mantêm boa aproximação dos resultados tanto para o EPD, EPT, como o estado misto, sendo que entre a integral J e o COD, esta aproximação é ainda mais estreita.

CONCLUSÕES

Os limites de validade da ASTM E 399, foram excedidos por todos os corpos de prova, não acontecendo o mesmo em relação a ASTM E 813. Observa-se também, que os valores do fator de intensidade de tensão crítico foram considerados consistentes, constatando que para os corpos de prova de flexão o método de Dowling e Townley apresentou maior coerência, enquanto que para os corpos de prova CT esta ocorreu com a integral J . As cargas de falha calculadas a partir de Dowling e Townley ficaram muito próximas daquelas obtidas nos en-

Nº CP	B	w	a	a/w	F _{máx.}	δF _{máx.}	ΔF _{máx.}	ΔpF _{máx.}	J _{máx.}	K _{IJ}	Estado de Fratura	r _{PEPD} mm	r _{PEPT} mm	
	mm	mm	mm		kN	mm	mm	mm	KJ/m ²	mPa√m				
Rev. a 500°C	21	24,36	50,0	26,6	0,532	97,7	0,39	1,32	1,25	413	305	misto	2,09	5,92
	22	24,36	50,0	27,8	0,557	92,0	0,44	1,48	1,23	440	315	misto	2,26	6,39
	31	24,36	50,0	35,1	0,702	42,7	0,22	1,48	0,34	191	207	misto	2,14	6,07
	32	24,36	50,0	37,0	0,740	34,1	0,23	1,14	0,74	229	227	misto	2,87	8,13
	41	06,10	50,0	25,0	0,500	29,6	0,57	0,93	1,24	552	336	EPT	3,09	8,76
	42	06,10	50,0	24,7	0,494	29,5	0,65	0,95	1,46	670	370	EPT	2,75	7,77
	61	06,10	50,0	25,2	0,504	29,7	0,56	1,10	1,16	546	334	EPT	3,39	9,61
	62	06,10	50,0	25,2	0,504	31,0	0,56	1,05	1,05	513	324	EPT	4,46	12,61

Tabela 1- Dimensões principais dos corpos de prova CT, revenidos a 500°C com respectivo carregamento máximo e característica de fratura. O CP 61 e 62 possui raio finito no fundo do entalhe.

Nº CP	B	w	a	a/w	L _p	F _{máx.}	δF _{máx.}	ΔF _{máx.}	J _{máx.}	K _{IJ}	Estado de Fratura	r _{PEPD} mm	r _{PEPT} mm	
	mm	mm	mm		mm	kN	mm	mm	KJ/m ²	mPa√m				
Rev. a 400°C	12	12,08	24,2	12,3	0,508	96	16,38	0,08	0,40	42	97	EPD	0,35	
	131	25,00	50,0	25,1	0,502	200	55,46	0,13	1,18	96	147	EPD	0,42	
	132	25,00	50,0	25,0	0,500	200	56,60	0,14	1,18	107	155	EPD	0,44	
	44	30,00	60,2	30,6	0,507	240	87,31	0,17	1,96	184	204	EPD	0,63	
Rev. a 500°C	111	06,20	12,4	06,4	0,512	48	07,36	0,14	0,59	144	180	misto	1,98	5,61
	41	06,20	24,0	12,5	0,520	96	11,67	0,20	0,97	192	208	misto	2,09	5,92
	31	12,08	24,0	07,2	0,297	96	48,95	0,23	1,19	321	269	misto	1,84	5,21
	32	12,08	24,0	07,8	0,327	96	45,91	0,21	1,18	311	265	misto	2,00	5,66
	33	12,08	24,0	11,6	0,483	96	32,47	0,17	1,06	265	244	misto	1,77	5,01
	35	12,08	24,0	14,6	0,592	96	17,26	0,15	0,97	165	193	misto	1,41	4,00
	22	24,80	50,0	26,8	0,536	200	81,32	0,31	2,25	394	298	EPD	1,80	
	142	30,00	60,0	37,5	0,625	240	82,40	0,34	2,58	382	293	EPD	2,18	
	43	25,00	24,0	12,6	0,525	96	49,24	0,18	1,14	223	224	EPD	1,72	
	44	48,00	24,0	13,0	0,537	96	41,92	0,20	1,57	309	264	EPD	1,63	

Tabela 2- Dimensões principais dos corpos de prova de flexão em três pontos, com trinca por fadiga com o respectivo carregamento máximo e característica de fratura.

CP Nº	K _C (J) mPa√m	K _C (COD) mPa√m	K _C (DT) mPa√m	
Rev. a 500°C	21	305	301	226
	22	315	320	235
	31	207	226	229
	32	227	231	265
	41	336	364	275
	42	370	389	259
	61	334	361	288
	62	324	361	330

Tabela 3- Resultados comparativos dos valores de K_C para três métodos da MFEP, em corpos de prova CT.

CP Nº	K _C (J) mPa√m	K _C (COD) mPa√m	K _C (DT) mPa√m	
Rev. a 400°C	12	97	141	101
	131	147	179	110
	132	155	186	135
	141	204	205	114
Rev. a 500°C	22	298	272	210
	142	293	285	234
	43	224	208	205
	44	264	219	200
	111	180	183	220
	41	208	219	226
	31	269	235	212
	32	265	224	221
	33	244	202	208
	35	193	190	186

Tabela 4- Resultados comparativos dos valores de K_C para três métodos da MFEP em corpos de prova de flexão em três pontos.

saios experimentais. A partir destas constatações iniciais, conclui-se que;

- Para aços de utilização comercial, o emprego dos métodos da MFEP, seguindo orientação da ASTM 813, é a maneira mais segura para determinar a tenacidade do material.

- A tenacidade não sofreu praticamente influência, quer seja obtida a partir de CPs com raio finito no fundo do

entalhe, quer seja obtida com um entalhe gerado por fadiga.

- Para uma fratura no estado misto de tensões, mantendo constante a espessura B, a tenacidade aumenta com a diminuição da relação a/w, tanto para corpos de prova CT quanto de flexão. Para o EPD, os corpos de prova revenidos a 400°C com a/w=0,5, tiveram sua tenacidade aumentada com o aumento da espessura B.

REFERÊNCIAS

- 1- ARROYO, I.K., Descontinuidades Geométricas e Fratura Dútil em aço estrutural. Diss.Mestr. UFSC,1979.
- 2- ASTM E 399-72, Standard Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
- 3- ASTM E 813-81, Standard Test for J_{IC}, A Measure of Fracture Toughness.
- 4- DARLSTON, B.J.L., The CEGB two criteria proposal. Developments in pressure vessel technology-1. Editor R.W. Nichols, Applied Science Publishers Ltd, London, 1979.
- 5- DIAS, A., Análise da MFEP. Diss. Mestr., UFSC,1983.
- 6- HAHN, G.T., ROSENFELD, A.R., Sources of Fracture Toughness: The relation between K_{IC} and the ordinary tensile properties of metals. ASTM, 1968, pp. 5-32.
- 7- Rice, J.R., A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. J.App.Mech., june 1968, pp. 379-368.

SUMMARY

The fracture toughness, in the upper shelf of the 4137 H steel was evaluated using the J integral, crack opening displacement and the Dowling and Townley criteria. The test was realized with CT and three point bending specimens, with tempering temperatures of 400°C and 500°C. The experimental results, obtained by different methods, shown a reasonable concordance.