

### 3. Estudo dos principais procedimentos para cálculo da Tenacidade

Neste capítulo apresentam-se os principais procedimentos de cálculo dos parâmetros que quantificam a tenacidade à fratura, tanto em regime linear elástico ( $K_{IC}$ ) como em elasto-plástico (CTOD e J). São mencionadas algumas diferenças nos requerimentos e metodologia dos testes. Atualmente os procedimentos mais usados no cálculo da tenacidade à fratura são os americanos ASTM E399[1], ASTM E1290[2], ASTM 1820[3], o britânico BS 7448[4] e o alemão EFAM GTP[5].

#### 3.1. Corpos de Prova (CP)

Os principais CPs usados nestes procedimentos são: (i) Flexão em três pontos SE(B), Fig. 3.1; (ii) Compacto de tração C(T), Fig. 3.2; (iii) Compacto de tração em forma de disco DC(T), Fig. 3.3; (iv) Tração em forma de arco A(T), Fig. 3.4; e (v) Compacto de tração com entalhe escalonado C(T)-EE, Fig. 3.5.

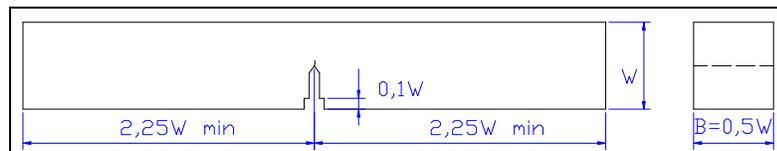


Figura 3.1 – CP de Flexão em três pontos – SE(B).

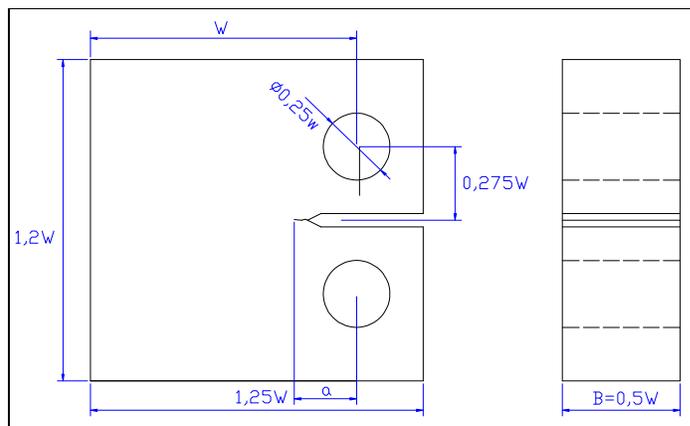


Figura 3.2 – CP Compacto de tração – C(T).

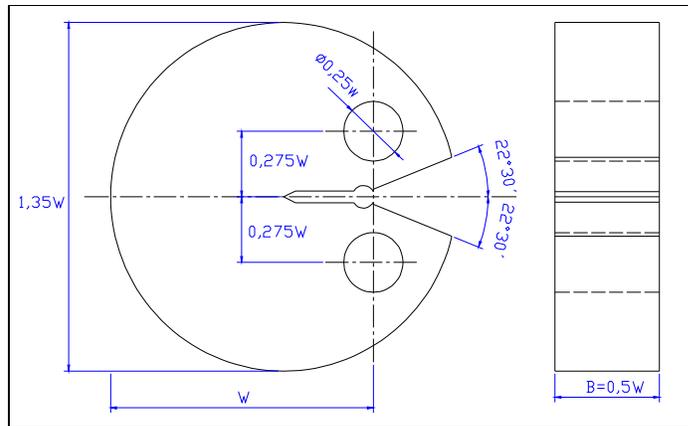


Figura 3.3 - CP Compacto de tração em forma de disco DC(T)

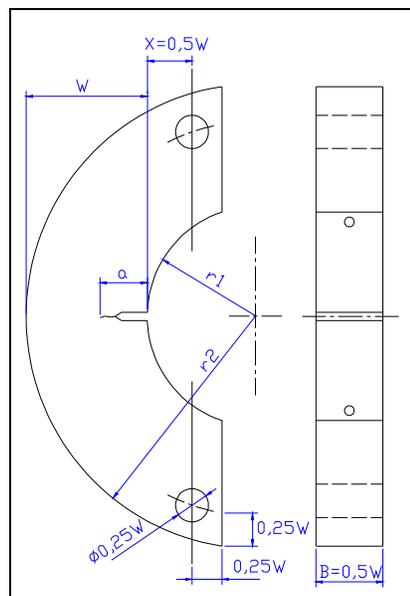


Figura 3.4 - CP de tração em forma de arco – A(T)

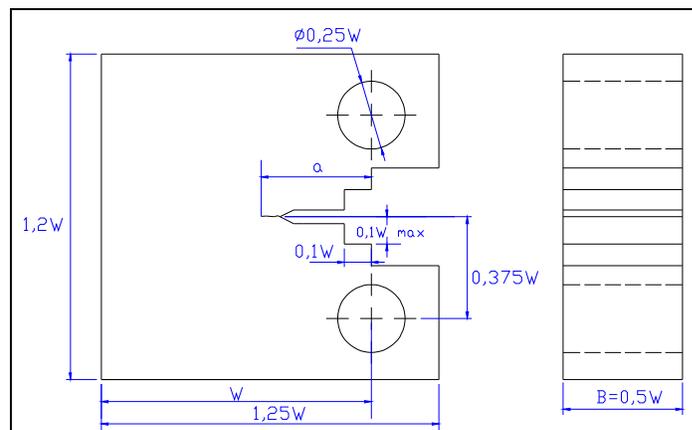


Figura 3.5 - CP Compacto de tração com entalhe escalonado C(T)-EE

As Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 listam os CPs segundo a norma de cálculo e o parâmetro a ser avaliado. Pode-se ver que os CPs usados em todas as normas são o SE(B) e C(T), e que as normas americanas utilizam somente o C(T) com entalhe reto. Entretanto, nas normas BS 7448 e EFAM GTP 02 se aceita o C(T) com entalhe escalonado (Figura 3.5). Já na E399-08 sugere-se o uso do A(B) e A(T), os quais não são mencionados nas outras normas. Todos esses CPs garantem uma alta restrição plástica na ponta do trinca. Na Figura 3.6 são mostrados alguns tipos de CPs não convencionais (nos procedimentos), os quais geram uma menor restrição na ponta da trinca e em consequência um maior valor da tenacidade.

	K <sub>IC</sub>					
	SE(B)	A(B)	C(T)-ER	C(T)-EE	DC(T)	A(T)
BS 7448:Parte 1:91	✓		✓	✓		
ASTM E1820-01	✓		✓		✓	
ASTM E399-08	✓	✓	✓		✓	✓
EFAM GTP 02	✓		✓	✓		

Tabela 3.1 – Tipos de CPs para cálculo de K<sub>IC</sub>.

	CTOD					
	SE(B)	A(B)	C(T)-ER	C(T)-EE	DC(T)	A(T)
BS 7448:Parte 1:91	✓		✓	✓		
ASTM E1820-01	✓			✓	✓	
ASTM E1290-02	✓	✓		✓		
EFAM GTP 02	✓		✓	✓		

Tabela 3.2 – Tipos de CPs para cálculo de CTOD.

	J <sub>c</sub>					
	SE(B)	A(B)	C(T)-ER	C(T)-EE	DC(T)	A(T)
BS 7448:Parte 1:91	✓			✓		
ASTM E1820-01	✓			✓	✓	
EFAM GTP 02	✓			✓		

Tabela 3.3 – Tipos de CPs para cálculo de J.

### 3.2. Pré-trinca de fadiga

A MFLE aplica-se às trincas que são idealmente agudas nos carregamentos iniciais. Os CPs de laboratório invariavelmente estão fora deste ideal, no entanto é possível introduzir trincas que são suficientemente agudas para a proposta prática. Como a trinca de fadiga é considerado o defeito mais crítico que se pode conseguir em um laboratório, o entalhe usinado é estendido por fadiga.

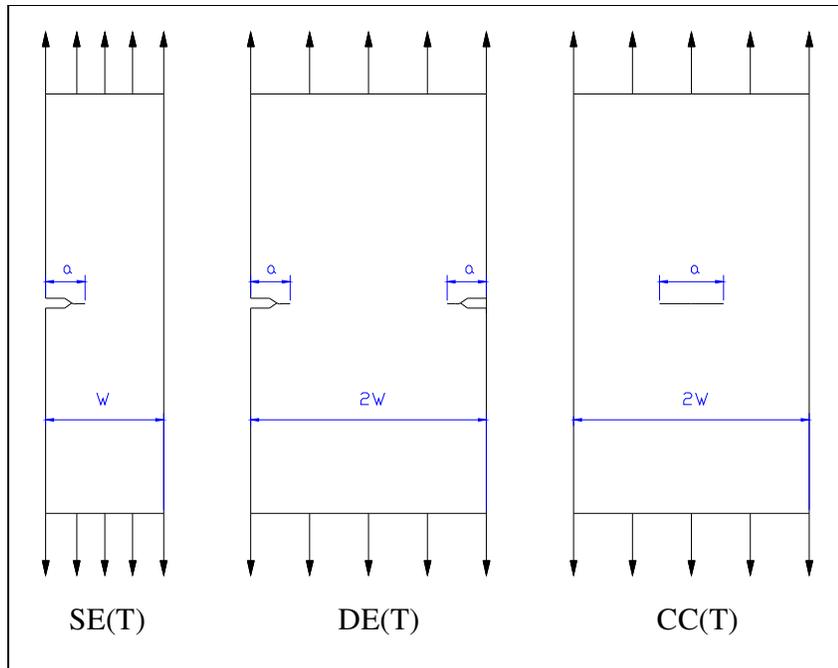


Figura 3.6 – CPs não convencionais.

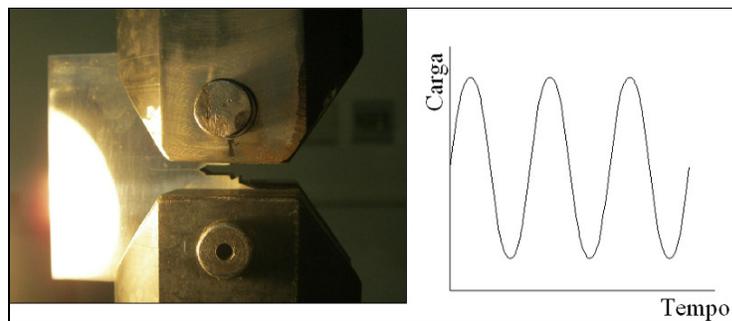


Figura 3.7 – Pré-trinca e carregamento variável.

Segundo a E399, a trinca de fadiga deve ser propagada pelo menos  $0,025W$  ou  $1,3 \text{ mm}$  à frente do entalhe usinado para eliminar quaisquer efeitos de geometria. Cada uma das normas de ensaio de fratura contém restrições no carregamento máximo de fadiga. Por exemplo, a norma E399 define  $P_f$  para um CP do tipo C(T) como :

$$P_f = \frac{0,4B(W-a_0)^2 \sigma_Y}{(2W+a_0)} \quad (3.1)$$

onde  $\sigma_Y$  é a tensão de referência, definida como a média entre o limite de escoamento e o limite de ruptura, definida como:

$$\sigma_Y = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_r}{2} \quad (3.2)$$

A variação do comprimento da pré-trinca de fadiga é feita através do controle da variação do fator de intensidade de tensões ( $\Delta K$ ). Na equação 3.3 é mostrada a expressão para o cálculo de  $\Delta K$  em um CP do tipo C(T). Nessa equação verifica-se que  $\Delta K$  depende do comprimento da trinca ( $a$ ), da variação do carregamento ( $\Delta P$ ) e das dimensões do CP ( $B$  e  $W$ ) [20]

$$\Delta K_I = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{1.5}} \left[ 0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,6 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (3.3)$$

As diversas normas para o cálculo da tenacidade apresentam diferentes valores de  $a_0$  (tamanho do entalhe + pré-trinca de fadiga) em relação à medida de  $W$ . A maioria das normas analisadas coincide na faixa de valores de  $a_0$  para o cálculo de  $K_{IC}$ , mas existe uma diferença entre as normas que avaliam CTOD e  $J$ . Na Tabela 3.4 são mostrados esses valores segundo cada procedimento. Observa-se que na BS7448 é usada unicamente uma faixa de valores para calcular os três parâmetros, enquanto na E1820-01 restringe-se essa faixa só para cálculo de  $K_{IC}$ .

Procedimento	$a_0$ - $K_{IC}$		$a_0$ - CTOD		$a_0$ - $J$	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
BS 7448:Parte 1:91	0.45W	0.55W	0.45W	0.55W	0.45W	0.55W
ASTM E1820-01	0.45W	0.55W	0.45W	0.70W	0.45W	0.70W
ASTM E399-08	0.45W	0.55W				
ASTM E1290-02			0.45W	0.70W		
EFAM GTP 02	0.45W	0.65W	0.45W	0.65W	0.45W	0.65W

Tabela 3.4 – Valores de  $a_0$  segundo cada procedimento.

Segundo todas essas normas, o tamanho mínimo da pré-trinca deverá ser maior do que  $0,45W$ , o que garante um alto nível de restrição plástica e, em consequência, um cálculo da tenacidade do lado da segurança.

### 3.3. Side Grooves (Entalhes Laterais)

Nos CPs a testar podem ser feitos entalhes laterais, como mostrado na Figura 3.8. O objetivo destes entalhes é de manter uma frente de trinca em um mesmo plano durante o desenvolvimento do teste. Um CP sem o entalhe lateral pode estar sujeito a um grande tunelamento de trinca e à formação de lábios de

cisalhamento, pois o material próximo da superfície externa encontra-se num baixo estado de triaxialidade de tensão. A redução da espessura deverá ser tal que não ultrapasse o valor de  $B_N = 0,7B$ [44].

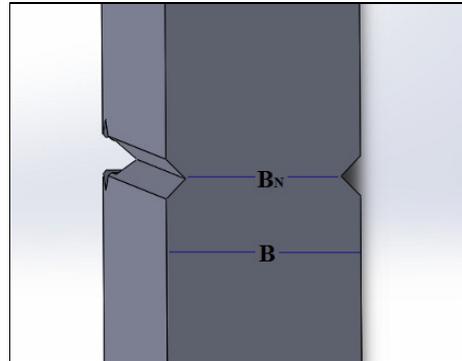


Figura 3.8 – *Side Groove*.

A respeito dos *side grooves*, existem várias referências que tentam explicar a influência destes entalhes no campo de tensões e deformações na ponta da trinca do CP. Sabe-se que perto da região das faces do CP o estado predominante é o de tensão plana, conseqüentemente nessa área são formados lábios de cisalhamento na fratura. Segundo Imai Y. et al. [44], o tamanho da região dos lábios de cisalhamento não reduz, não importa a espessura do CP. Portanto utilizar espessuras maiores influi pouco no comportamento nas faces do CP. Nesse estudo analisou-se o crescimento de trincas estáveis em vários tipos de *side grooves* em um CP SE(B), como mostrados na Figura 3.9.

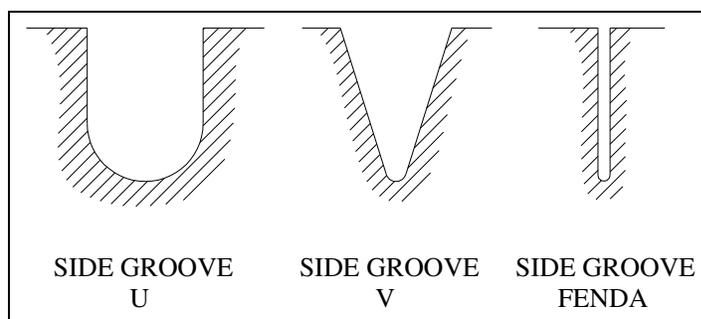


Figura 3.9 – Tipos de *Side Groove*.

A Figura 3.10(A) mostra o frente de uma trinca estável para um CP sem entalhe lateral. Pode-se notar uma frente de trinca curvada (na forma de unha de polegar). Em contraste, os CPs devidamente entalhados (B, C, D) mostraram uma frente de trinca quase reta. Notou-se também que o efeito dos entalhes laterais no

estado de tensão elastoplástico varia com a geometria do entalhe, o raio de curvatura, a profundidade e as propriedades do material do CP.

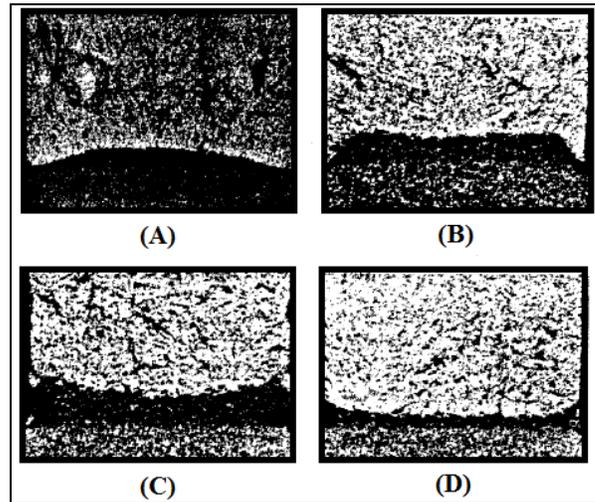


Figura 3.10 – Frentes de trinca em CP SE(B), (A) sem *side groove*, (B) tipo U, (C) tipo V, (D) fenda de 0,2 mm [44].

Dos resultados da análise pode-se concluir que entalhes laterais restringem o estado plano de tensão perto das faces do CP, resultando em uma zona plástica uniforme na ponta da trinca em aproximadamente 80% de toda a espessura.

Outro estudo [45] testou CP em miniatura do tipo C(T) (MCT) para avaliar a influência dos *side grooves* na tenacidade. CPs sem entalhe lateral e com entalhe lateral em V (raio = 0,1; 0,25; 0,5 e 1mm) foram testados considerando três técnicas de cálculo: Flexibilidade Elástica, Queda de Potencial e Normalização de Carga. O estudo mostra que os CPs sem entalhe lateral apresentaram valores de tenacidade maiores que os CPs com entalhe lateral. Nestes últimos comprovou-se que não existe uma influência do raio do entalhe lateral na tenacidade à fratura.

### 3.4. Procedimento de ensaio $K_{Ic}$

Segundo os procedimentos analisados, para o cálculo de  $K_{Ic}$  deve ser registrado o gráfico força vs. deslocamento da boca do entalhe ou da linha de aplicação da força. O registro terá a aparência de um dos seis gráficos mostrados na Figura 3.11 :

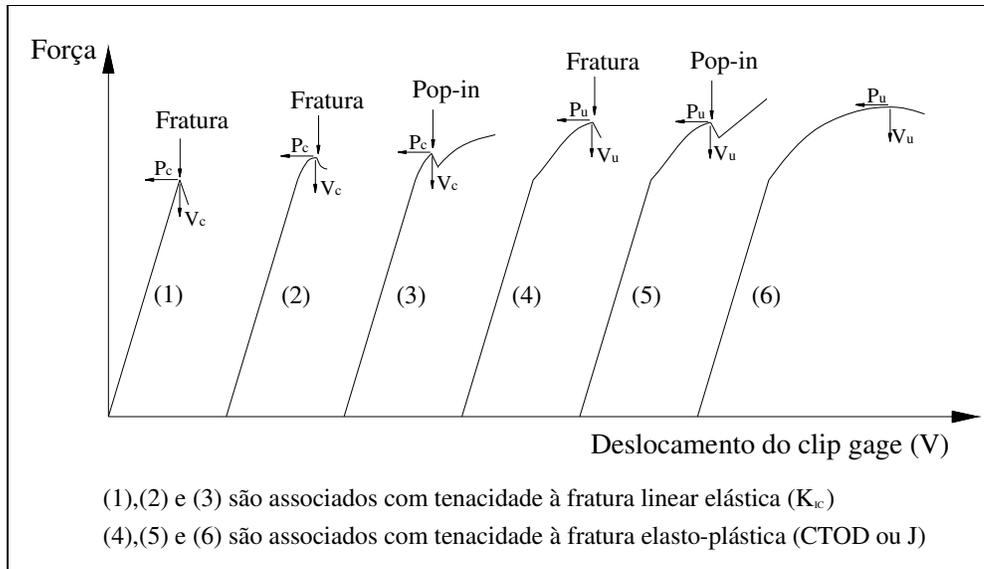


Figura 3.11 – Diferentes tipos de registro do teste

O carregamento é aplicado até que o CP não possa suportar mais a força. Após o término do teste, em todos os procedimentos recomenda-se primeiro examinar a superfície de fratura do CP, para depois proceder a medição do comprimento inicial da trinca ( $a_0$ ) e a eventual propagação estável. Todos os procedimentos exceto a E399 recomendam que as medições devem ser feitas em nove pontos igualmente espaçados, onde os pontos externos devem ser localizados a 1%B (BS7448 e EFAM GTP 02) ou 0,005W (ASTM) da superfície do CP. O comprimento inicial da trinca ( $a_0$ ) deve ser obtido, em primeiro lugar na média de duas medições feitas nos pontos externos. Em seguida, a média desses valores com os sete pontos interiores. Isso envolverá a soma ponderada das dimensões a ser dividida por oito, como é mostrado na equação 3.4 e na Figura 3.12.

$$a = \frac{1}{8} \left\{ \frac{a_1 + a_0}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right\} \quad (3.4)$$

Para o teste ser válido,  $a_0$ , deve cumprir os seguintes requisitos:

- $a_0/W$  deve estar na faixa permitida na tabela 3.1.
- A diferença entre dois dos nove pontos das medidas de comprimento da trinca não deve exceder  $0,1a_0$  (BS7448 e EFAM GTP 02) ou  $0,05a_0$  (ASTM).

- Nenhuma parte da frente da pré-trinca deve estar mais perto do início do entalhe que 1,3mm ou 2,5%, o que for maior.

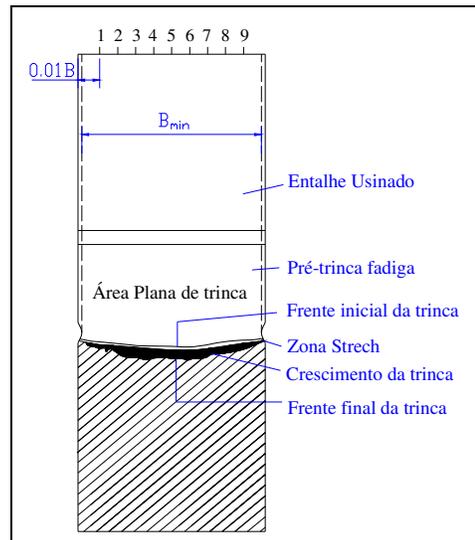


Figura 3.12 – Esquema para medição de  $a_0$ .

O procedimento sugerido na norma ASTM E399-08 recomenda medir o comprimento da trinca,  $a$ , após a ruptura, no centro da parte dianteira, no meio do caminho entre o centro da frente da trinca e o final em cada superfície do CP. Para calcular  $K_Q$  deve-se usar a média dessas três medições como o comprimento da trinca. Para validar as medições de  $a_0$ , os seguintes requisitos devem ser atendidos:

- A diferença entre quaisquer duas das três medições do comprimento da trinca não pode exceder 10% da média.
- Nenhuma parte da trinca frontal deve estar mais próxima do início do entalhe usinado em uma distancia de pelo menos 2,5%  $W$  ou 1,3 mm. Adicionalmente, a medida do comprimento da trinca superficial não deve diferir da média do comprimento da trinca em mais de 15%, e as diferenças entre essas duas medidas não podem exceder 10% da média do comprimento da trinca. Finalmente, o plano da trinca deve ser paralelo à direção da largura e espessura da amostra dentro de  $10^\circ$ .
- Todos os procedimentos das normas concordam que é necessário calcular primeiro  $K_Q$ , e depois determinar se esse resultado é consistente com o tamanho e com a resistência ao escoamento requeridos. O esquema da

Figura 3.13 mostra o procedimento para estimar o valor de  $P_Q$ , o qual será relacionado com  $K_Q$ .

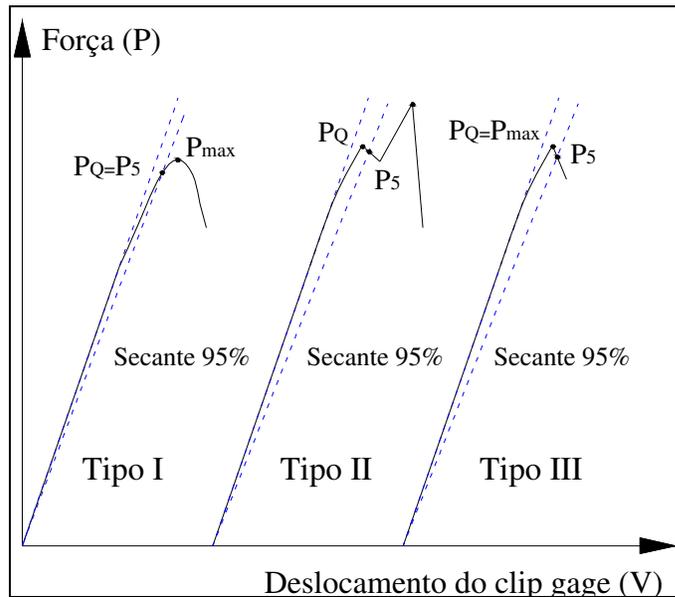


Figura 3.13 – Esquema para cálculo de  $P_Q$

Após estimar o valor de  $P_Q$ , calcula-se  $P_{max}/P_Q$ , onde  $P_{max}$  é a máxima carga que o CP pode suportar. Se a relação definida exceder 1,1, o teste não é um teste de  $K_{IC}$  válido, porque é possível que  $K_Q$  não tenha relação com  $K_{IC}$ . Neste caso, deve-se avaliar se os valores CTOD ou J podem ser determinados. Se a relação não exceder 1,1, procede-se com o cálculo de  $K_Q$ . Deve-se usar uma expressão apropriada para o CP determinado. Segundo os procedimentos analisados,  $K_Q$  pode ser calculado, para CP do tipo C(T), com a seguinte expressão:

$$K_Q = \frac{P_Q}{BW^{0,5}} f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (3.5)$$

A seguir procede-se com o cálculo do fator  $2,5\left(\frac{K_Q}{\sigma_{YS}}\right)^2$ . Caso esse valor seja

menor que  $a_0$ ,  $B$  e  $W - a_0$ , e se todos os outros critérios são cumpridos, então  $K_{IC} = K_Q$ . Caso contrário, o teste de  $K_{IC}$  não é válido, e somente o valor de  $K_Q$  pode ser reportado. Na Figura 3.14 mostra-se um esquema do cálculo da tenacidade tomando em conta o procedimento descrito acima.

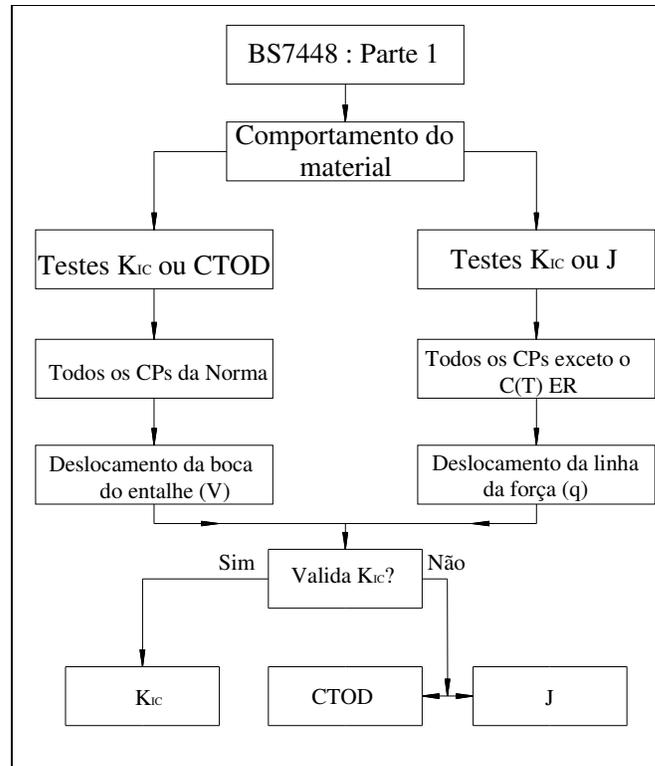


Figura 3.14 – Esquema para cálculo da tenacidade.

### 3.5. Procedimento de ensaio CTOD

Os procedimentos que calculam CTOD utilizam também o registro força vs. deslocamento da boca do entalhe (Figura 3.15). Para o cálculo desse parâmetro, nas normas BS7448 e ASTM E1820-01 utiliza-se a componente plástica do deslocamento ( $V_p$ ), enquanto na norma E1290-02 utiliza-se a área ( $A_p$ ) definida como a área abaixo da curva F vs. V. As equações 3.6 e 3.7 mostram a expressão usada para o cálculo de CTOD, em um CP do tipo C(T) com entalhe escalonado, segundo a norma BS7448 e a ASTM E1290-02 respectivamente.

$$\delta = \left[ \frac{P}{BW^{0.5}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{ys}E} + \frac{0,46(W-a_0)V_p}{0,46W+0,54a_0+(C-W)+z} \quad (3.6)$$

$$\delta = \frac{1}{m\sigma_y} \left[ \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta A_p}{B(W-a_0) \left( 1 + \frac{(\alpha+z)}{0,8a_0+0,2W} \right)} \right] \quad (3.7)$$

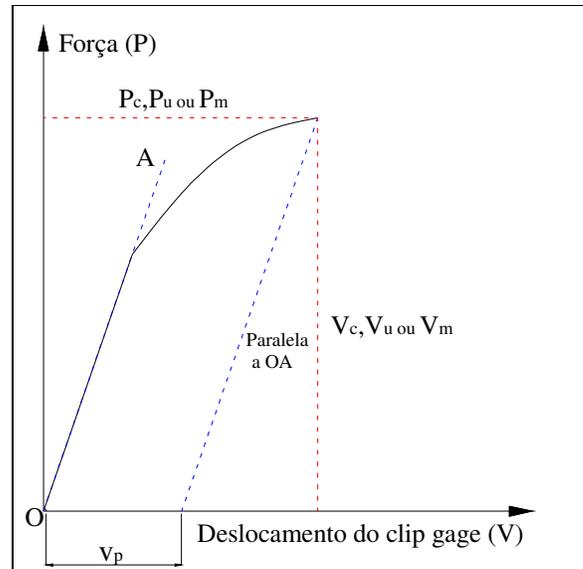


Figura 3.15 – Cálculo de  $V_p$ .

### 3.5.1. Comentários a respeito do cálculo de CTOD

A Figura 3.16 mostra as expressões utilizadas nas diferentes normas de cálculo de CTOD para um mesmo tipo de CP.

Note-se a similaridade das expressões para o cálculo de CTOD entre o procedimento na norma BS7448 e o procedimento básico da ASTM 1820-01. Eles são baseados no modelo de rótula plástica e estimam o CTOD a partir da abertura da boca da trinca. Essa metodologia continua vigente na norma unificada BS7448. Este modelo foi também utilizado no início pela norma ASTM E1290, mas na revisão do ano 2002 foi sugerido avaliar o CTOD a partir do cálculo do parâmetro  $J$ , como também aconteceu na revisão do ano 2008 da norma ASTM 1820.

Atualmente o CTOD geometricamente definido tem desaparecido das normas ASTM, pois o cálculo do CTOD é relacionado diretamente com o parâmetro  $J$ . Na comparação feita na Figura 3.16, considera-se o procedimento da ASTM 1280-01 que ainda baseia seu cálculo no CTOD geométrico. Na norma ASTM 1280-08a[46] avalia-se o CTOD a partir do parâmetro  $J$ , da seguinte maneira:

$$\delta = \frac{J}{m\sigma_y} \quad (3.8)$$

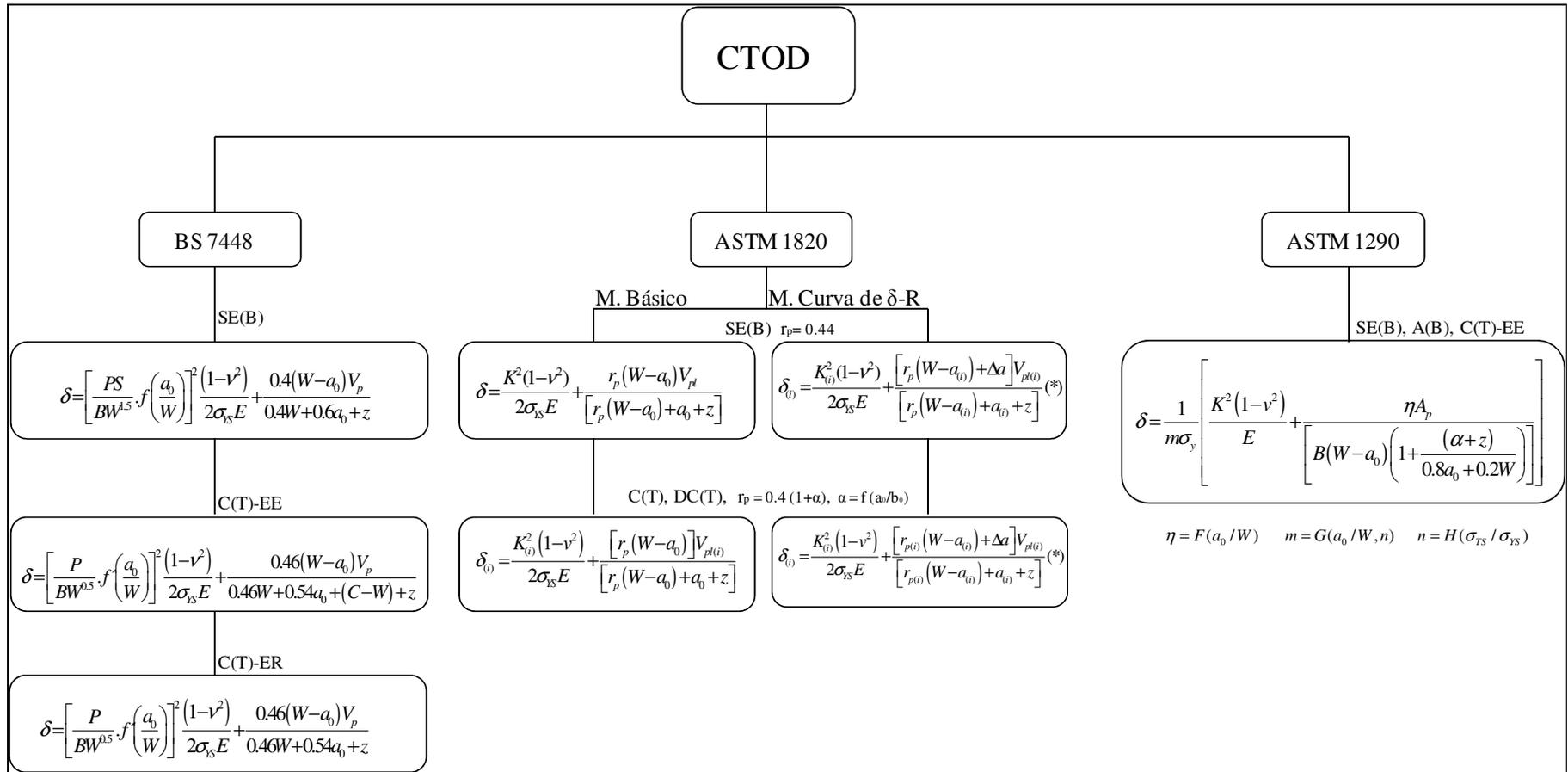


Figura 3.16 – Cálculo do CTOD nas diferentes normas.

Então, após a revisão da norma E1820 fica claro que existe uma diferença marcante entre o modelo de cálculo do “CTOD americano” e o “CTOD inglês”, essa diferença é mencionada em [11].

### 3.6. Procedimento de ensaio J

O cálculo de J na norma BS7448 e na ASTM 1820-01 é baseado na área abaixo da curva força vs deslocamento da linha de aplicação da força (Figura 3.17). A área pode ser determinada diretamente do registro do teste, ou por integração numérica. Pode-se também combinar essas técnicas. Adicionalmente, um método analítico com base no comportamento elástico pode ser adotado, ele envolve a subtração da área elástica teórica total.

A equação 3.9 mostra a expressão usada para o cálculo de J segundo a norma BS7448, considerando um CP tipo C(T) com entalhe escalonado.

$$J = \left[ \frac{FS}{BW^{0.5}} \cdot f' \left( \frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_p A_p}{B(W-a_0)} \quad (3.9)$$

Na Figura 3.18 é observada uma similaridade entre as expressões usadas pela norma BS7448 e o procedimento básico da ASTM 1820-01.

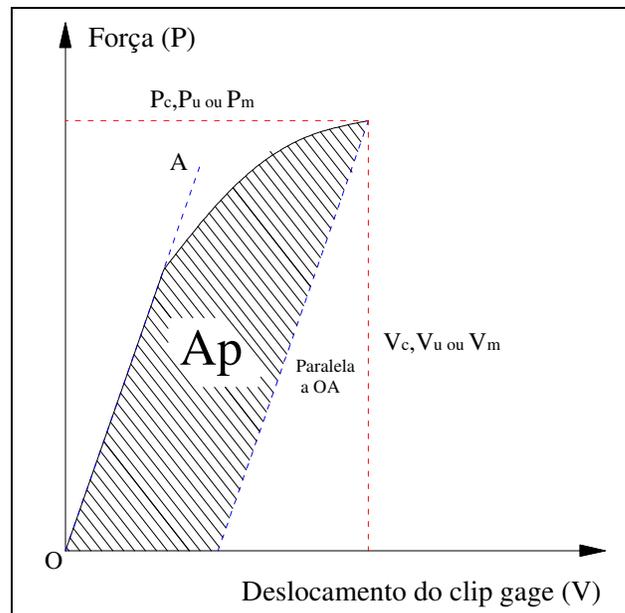


Figura 3.17 – Área Força(P) vs deslocamento do clip gage(V).

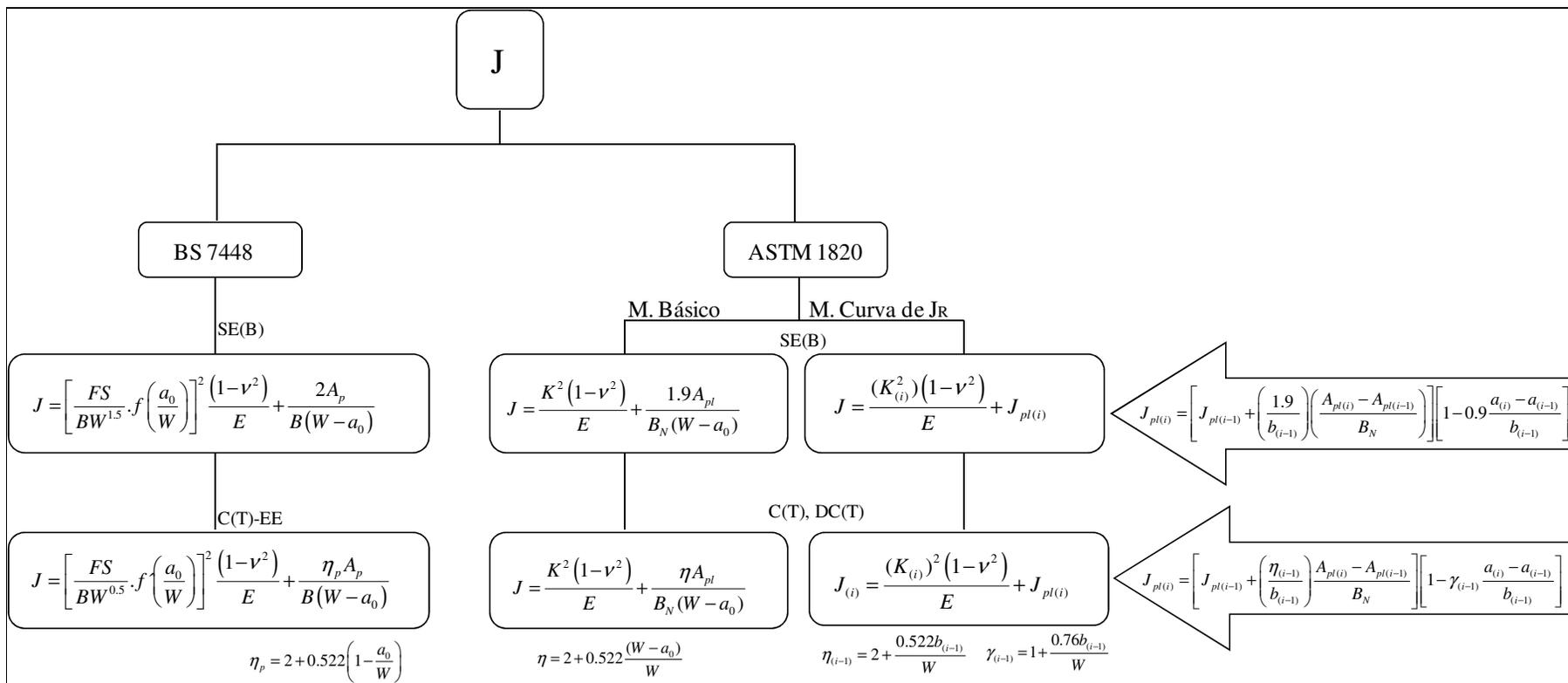


Figura 3.18 – Cálculo do J nas diferentes normas.

### 3.7. Procedimento para obtenção da curva $J_R$

A técnica experimental mais usada para obtenção da curva  $J_R$  é o método da flexibilidade no descarregamento (*unloading compliance*), ilustrado na Figura 3.19. Esse método consiste em pequenos descarregamentos do CP, enquanto se determina a curva de carga vs. deslocamento. A inclinação ( $1/C$ ) das linhas geradas durante o descarregamento parcial se relaciona com as medidas da flexibilidade estática do CP. Assim, o comprimento de trinca é calculado em intervalos regulares de teste, através da medição da flexibilidade do CP após o respectivo descarregamento parcial.

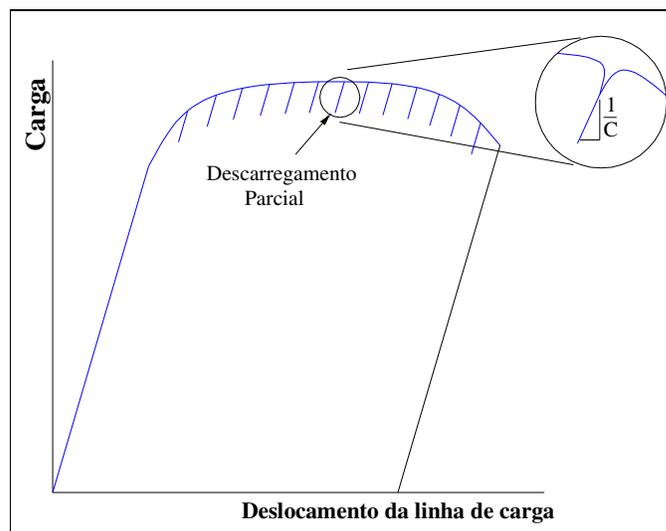


Figura 3.19 – Método “*unloading compliance*”..

Como o tamanho da trinca muda durante o teste de curva  $J_R$ , a integral  $J$  deve ser calculada incrementalmente. A forma mais lógica para atualizar o valor de  $J$  é a cada ponto de descarregamento, onde o tamanho da trinca também é atualizado. Para o cálculo da curva  $J_R$ , considera-se um teste  $J$  com  $n$  pontos de medição. Para um dado ponto de medição  $i$ , onde  $1 \leq i \leq n$ , as componentes elástica e plástica de  $J$  podem ser estimadas a partir das seguintes equações :

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (3.10)$$

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (3.11)$$

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (3.12)$$

A norma ASTM 1820 define os fatores e expressões para cálculo desta curva considerando os CPs padronizados, por exemplo para um CP do tipo SE(B), o fator de intensidade de tensão  $K_{(i)}$  está relacionado à carga aplicada  $P_{(i)}$  e  $a_{(i)}/W$  através da equação seguinte:

$$K_{(i)} = \left[ \frac{P_{(i)} S}{(B B_N)^{0,5} W^{1,5}} \right] f \left( \frac{a_i}{W} \right) \quad (3.13)$$

onde :

$$\eta_{(i-1)} = 1,9 \quad (3.14)$$

$$\gamma_{(i-1)} = 0,9 \quad (3.15)$$

A partir dos valores do tamanho de trinca inicial ( $a_0$ ), crescimento de trinca ( $\Delta a$ ), e carga aplicada ( $P$ ), considerando todas as equações estabelecidas pelo método, cada descarregamento parcial gera um par  $J$ - $\Delta a$ , dando origem à curva  $J_R$  ilustrada na Figura 3.20.

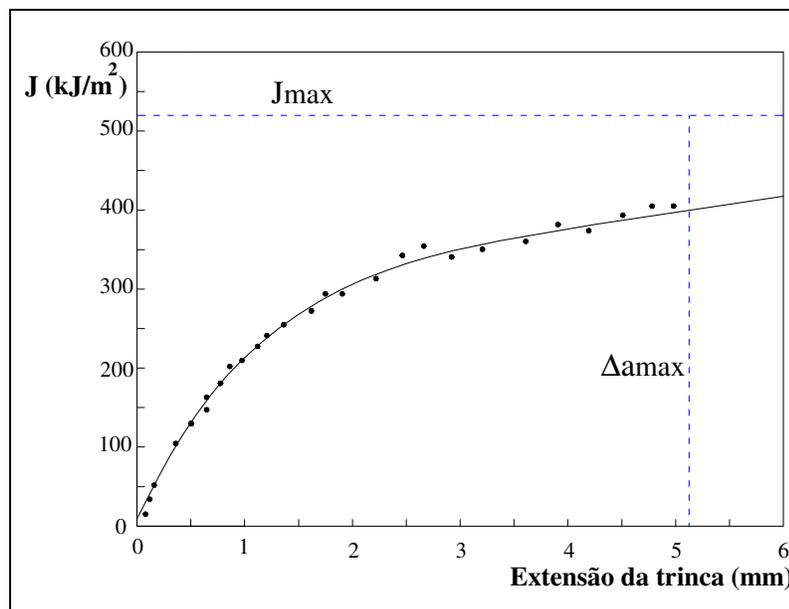


Figura 3.20 – Curva  $J_R$  [3].

A finalidade da obtenção da curva  $J_R$  é de determinar um valor de  $J$  crítico, por exemplo  $J_{IC}$ , através do qual pode-se avaliar se ocorrerá ou não crescimento estável de trinca no regime elasto-plástico. Caso o valor de  $J$  seja maior ou igual à  $J_{IC}$ , estima-se que ocorrerá crescimento estável de trinca. Na Figura 3.21 é mostrado o modelo de curva  $J_R$  que é obtido após a realização do ensaio, de acordo com ASTM E-1820. Nessa são traçadas as seguintes linhas:

- Linha de Embotamento: Traçada a partir da origem da curva experimental da integral  $J$ , obtida a partir da equação 3.16. A finalidade da linha de embotamento é de representar os primeiros estágios subcríticos da propagação da trinca.

$$J=2\sigma_Y\Delta a \quad (3.16)$$

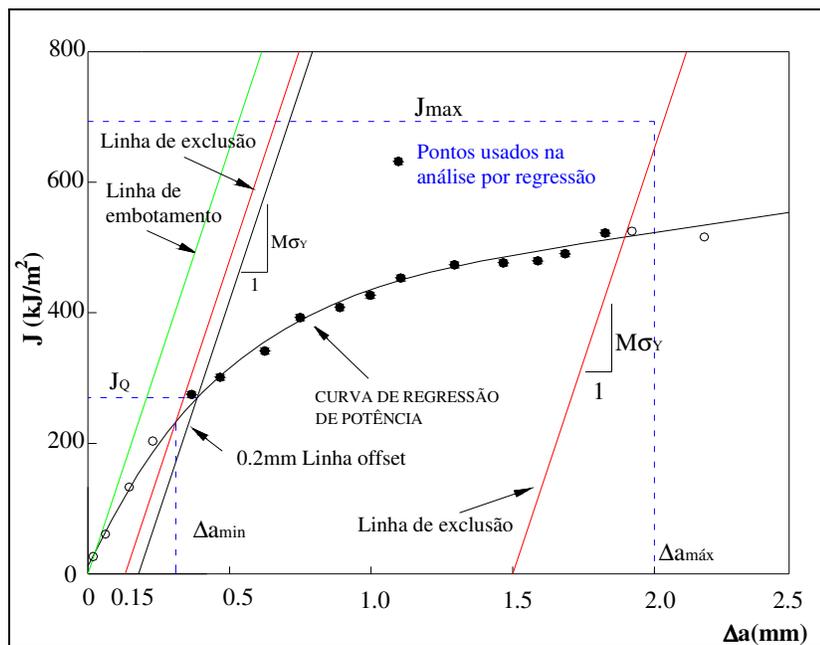


Figura 3.21 – Curva  $J_R$  segundo a norma ASTM E-1820[3]

- Linhas de Exclusão: Traçadas a 0,15mm e a 1,5mm da linha de embotamento no eixo da abscissa. Os valores de  $\Delta a_{\min}$  e  $\Delta a_{\max}$  são obtidos pela intersecção das linhas de exclusão com a curva experimental de  $J$ . Os pontos que ficarem abaixo de 0,15mm são excluídos, pois se considera que abaixo deste valor não ocorre crescimento efetivo de trinca. Valores experimentais dos pontos que ficarem acima de 1,5mm também serão excluídos. As duas linhas de exclusão garantem que os valores dos pontos experimentais da curva de  $J$  vão estar acima de  $\Delta a_{\min}$  e abaixo  $\Delta a_{\max}$ .

- Linha “Offset”: É traçada a 0,2mm por convenção para a determinação de  $J_{IC}$ . Na Figura 3.22 é ilustrada uma região denominada de “região de dados válidos” localizada a 0,15mm e a 1,5mm das linhas de embotamento entre  $\Delta a_{min}$  e  $\Delta a_{lim}$ , e o  $J_{lim}$ .

É traçada nessa região uma curva de regressão de potência nos pontos experimentais da curva para a determinação de  $J_Q$ , candidato a se tornar  $J_{IC}$ . O valor de  $J_Q$  obtido será confirmado como sendo  $J_{IC}$  se forem satisfeitas algumas condições exigidas pela norma. É necessário que tenha pelo menos um ponto experimental entre  $\Delta a_{min}$  e a 0,5mm no eixo das abscissas, região A, e no mínimo cinco pontos experimentais entre 0,5mm e 1,5mm, região B, na região de dados qualificados, para poder traçar a curva de regressão de potência. A equação 3.17 descreve a curva de regressão obtida a partir da curva experimental da integral J.

$$J = C_1 \left( \frac{\Delta a}{K} \right)^{C_2} \quad (3.17)$$

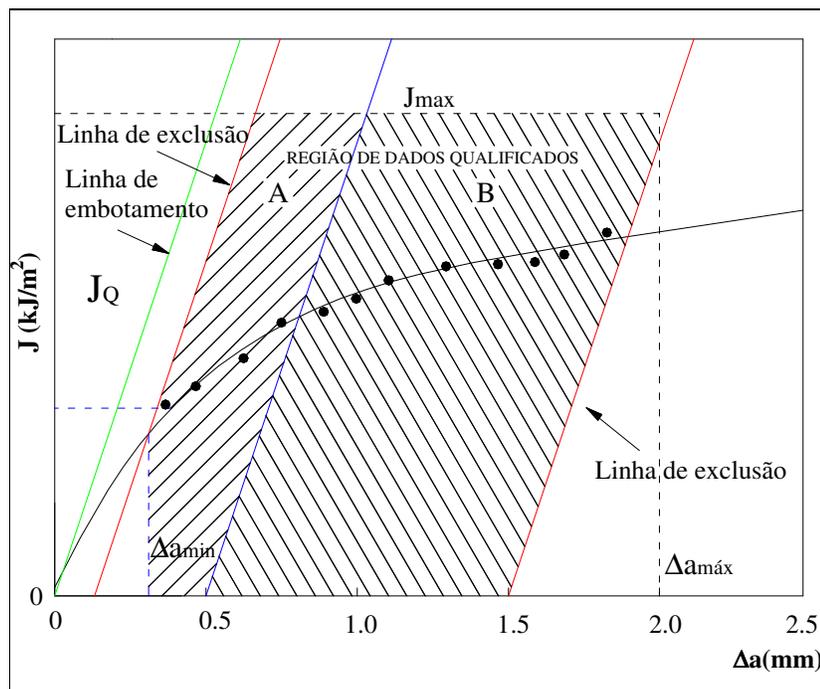


Figura 3.22 – Região de dados qualificados da Curva  $J_R$  [3].

$C_1$  e  $C_2$  são constantes da expressão,  $K = 1\text{mm}$  e  $\Delta a$  é a variação do comprimento da trinca.

Como já foi mencionado, o método de flexibilidade no descarregamento consiste no cálculo do comprimento da trinca em intervalos regulares durante o ensaio, através dos descarregamentos parciais do CP, e nas medidas da sua flexibilidade (“*compliance*”), que é o recíproco da inclinação da curva carga vs. deslocamento. O CP torna-se mais flexível quando a trinca cresce, e esse aumento de flexibilidade é associado ao incremento da extensão dúctil da trinca, através de sucessivos ciclos de descarregamento e recarregamentos parciais. Esses ciclos devem ocorrer sempre elasticamente, como exigido pelo método de flexibilidade. As “*flexibilidades*” ( $C_1, C_2, C_3, C_4, \dots, C_i$ ) correspondentes aos pontos de descarregamentos são relacionadas à razão  $a/W$ .

Na norma ASTM E1820 são fornecidas expressões polinomiais que relacionam essa razão à flexibilidade,  $C_i$ , do CP. Estas expressões são válidas somente para trincas profundas, ou seja as que estão dentro da faixa aceita pela norma. Para o CP SE(B), recomendam-se as equação 3.21 para relacionar a flexibilidade do CP com o tamanho da trinca ( $a_i$ ):

$$\frac{a^{(i)}}{W} = 0,999748 - 3,9504u + 2,9821u^2 - 3,21408u^3 + 51,51564u^4 - 113,031u^5 \quad (3.18)$$

sendo:

$$u = \frac{1}{\left[ \frac{B_e W E C_i}{S/4} \right]^{0,5} + 1} \quad (3.19)$$

onde  $C_i$  é a flexibilidade elástica (“*compliance*”), dada por  $\Delta V_x / \Delta P_i$  na sequência de descarregamentos, e  $V_x$  e  $P_i$  são, respectivamente, os incrementos de deslocamento e da carga correspondente.  $B_e$  é a espessura do CP e  $E$  representa o módulo de elasticidade do material.

Os efeitos da plasticidade característica dos metais com elevada ductilidade é uma das principais dificuldades quanto ao uso deste método. O tunelamento que surge na frente da trinca pode causar dois problemas: a superestimativa de  $J$  ou a subestimativa dos valores de propagação dúctil de trinca ( $\Delta a$ ).

### 3.7.1. Comentários a respeito do cálculo da curva $J_R$

O procedimento mostrado anteriormente é aceito somente para CPs padronizados pela norma. A ASTM 1820 só considera os parâmetros para cálculo da curva  $J_R$  em três tipos de CPs, SE(B), C(T) e DC(T). As normas BS 7448 e EFAM GTP 02 porém só consideram os CPs SE(B) e C(T), limitando assim o estudo da tenacidade em CPs tipo SE(T), DE(T) e CC(T). Além disso, historicamente as expressões para cálculo das curvas  $J_R$  são fornecidas somente para o tratamento de CPs com trinca profunda ou dentro da faixa permitida pela norma (na ASTM 1820  $0,45 \leq a/W \leq 0,7$ ), excluindo assim o tratamento de CPs com trincas rasas, para incentivar o cálculo conservativo da propriedade. Porém na última versão da norma americana ASTM 1820-11[47], pode-se encontrar um apêndice final com o título “*guidelines for measuring the fracture toughness of materials with shallow cracks*” o qual fornece expressões para cálculo da curva  $J_R$  em tamanhos de trinca de  $0,05 < a/W < 0,45$ . Somente é recomendado o CP tipo SE(B), e o procedimento é claro em mencionar que o cálculo da tenacidade em CPs com trincas rasas é não conservativo comparado com os procedimentos em CPs de trinca profunda. Além disso, menciona o fato que podem existir diferenças entre os campos de deformações no CPs de teste e as condições de campo, e que as medidas de tenacidade são fortemente influenciadas pelo tamanho da trinca e a geometria do CP. A seguir as expressões a fornecidas nesta aplicação :

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (3.20)$$

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (3.21)$$

$$J_{pl(i)} = J_{pl(i-1)} + \frac{\eta_{(i-1)} [A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}]}{B_N b_{(i-1)}} \quad (3.22)$$

onde :

$$\eta_{(i-1)} = 3,667 - 2,199 \left( \frac{a}{W} \right) + 0,437 \left( \frac{a}{W} \right)^2 \quad (3.23)$$

$$\frac{a_{(i)}}{W} = 1,01878 - 4,5367u + 9,0101u^2 - 27,333u^3 + 74,4u^4 - 71,4891u^5 \quad (3.24)$$

$$u = \frac{1}{\left[ \frac{B_e W E C_i}{S/4} \right]^{0,5} + 1} \quad (3.25)$$

### 3.8. Procedimento para obtenção da curva $J_R$ em CPs SE(T)

O uso de CPs padronizados pode levar a previsões de tenacidade conservativas, devido ao alto grau de traxialidade apresentado nesses espécimes. A avaliação da tenacidade nos CPs com trinca profunda para avaliação de defeitos superficiais em dutos ou vasos de pressão vem sendo questionada devido aos efeitos da restrição plástica sobre as curvas  $J_R$ . Testes experimentais em CPs de diferentes geometrias, profundidades relativas de trinca e modos de carregamento demonstraram esses efeitos [48].

No caso particular de dutos e vasos cilíndricos, há um interesse na predição do comportamento à fratura baseado em CPs à tração com entalhe lateral (SE(T)). A principal motivação para o uso desse tipo de CP na avaliação de defeitos em dutos é a forte similaridade dos campos de tensões e deformações que determinam a fratura para ambas as configurações. Embora estudos sobre a aplicabilidade de CPs SE(T) em procedimentos de engenharia para a avaliação de defeitos neste tipo de estrutura demonstrem que este tipo de CP apresenta grande plastificação durante a evolução do carregamento o qual potencialmente invalida as condições de dominância J, a semelhança dos campos de tensões e deformações entre esta geometria e dutos contendo defeitos superficiais justificam seu uso [15].

Neste trabalho são feitos testes em CPs tipo SE(T) para avaliar a diferença nas medições de tenacidade em relação a testes em CPs padronizados tipo SE(B). Também são feitos testes considerando a variação do comprimento inicial de trinca (rasa e profunda), para medir a sensibilidade desse parâmetro nas curvas de tenacidade deste CP. Cravero e Ruggieri [15] desenvolveram procedimentos para avaliar as curvas  $J_R$  seguindo o método de flexibilidade em CPs SE(T) com diferentes relações geométricas e tipo de fixação nas garras de carregamento,

considerando as propriedades do material usado. Segundo o método de flexibilidade, a integral J pode ser estimada como :

$$J_{(i)} = J_{el(i)} + J_{pl(i)} \quad (3.26)$$

$$J_{el(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1-\nu^2)}{E} \quad (3.27)$$

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i-1)} + \left( \frac{\eta_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \left[ 1 - \gamma_{(i-1)} \frac{a_{(i)} - a_{(i-1)}}{b_{(i-1)}} \right] \quad (3.28)$$

De acordo à metodologia desenvolvida por Cravero e Ruggieri, para CPs SE(T) solicitados por garras, a qual foi usada em nossos testes (existe também uma expressão para fixação por pinos) e derivados de COD, tem-se :

$$\eta = 1,0398 - 0,687 \left( \frac{a}{W} \right) \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \gamma = & (A-1) + B \left( \frac{a}{W} \right) + C \left( \frac{a}{W} \right)^2 + D \left( \frac{a}{W} \right)^3 \\ & + \frac{-B + (B-2C) \left( \frac{a}{W} \right) + (2C-3D) \left( \frac{a}{W} \right)^2 + 3D \left( \frac{a}{W} \right)^3}{A + B \left( \frac{a}{W} \right) + C \left( \frac{a}{W} \right)^2 + D \left( \frac{a}{W} \right)^3} \end{aligned} \quad (3.30)$$

onde as constantes A, B, C e D dependem da relação entre a altura e largura do CP (H/W) e o expoente de encruamento do material (n).

A flexibilidade normalizada é dada por :

$$u = \frac{1}{1 + \sqrt{B_e W E C_i}} \quad (3.31)$$

A relação a/W é ajustada a um polinômio de grau 5 com diferentes constantes, dependentes do tipo de fixação e da relação (H/W)

$$\frac{a_{(i)}}{W} = \beta_0 + \beta_1 u + \beta_2 u^2 + \beta_3 u^3 + \beta_4 u^4 + \beta_5 u^5 \quad (3.32)$$

E a função  $f(a/W)$  é dada por uma expressão de quinto grau cujos coeficientes dependem também da relação  $(H/W)$  :

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1\left(\frac{a}{W}\right) + \varepsilon_2\left(\frac{a}{W}\right)^2 + \varepsilon_3\left(\frac{a}{W}\right)^3 + \varepsilon_4\left(\frac{a}{W}\right)^4 + \varepsilon_5\left(\frac{a}{W}\right)^5 \quad (3.33)$$