

5. Testes de caracterização do material

Este capítulo descreve os testes de caracterização de material utilizados no presente trabalho. O material usado foi um aço estrutural de uso comercial AISI 1020. O estudo das normas de tenacidade e AIE requerem o conhecimento do comportamento mecânico do material avaliado. Os testes de caracterização realizados são detalhados a seguir:

- Metalografia
- Testes de tração
- Testes de tenacidade à fratura
- Fractografia

5.1. Metalografia

Para a análise metalográfica foram usadas partes dos CPs de tração, no sentido longitudinal e transversal, sendo que essas partes foram embutidas em baquelite conforme Figura 5.1.

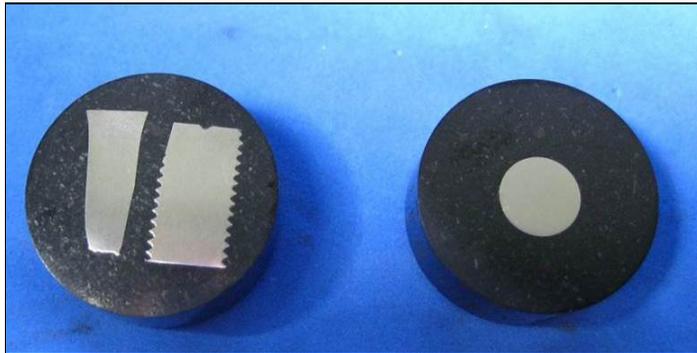


Figura 5.1 – Amostras embutidas em baquelite.

Na Figura 5.2 pode-se notar o aspecto geral da microestrutura da chapa (aço de baixo carbono) que é composta por ferrita (parte clara) e perlita (parte escura) nas fotos tiradas pelo microscópio. Percebe-se também o sentido da laminação da chapa em sua microestrutura.

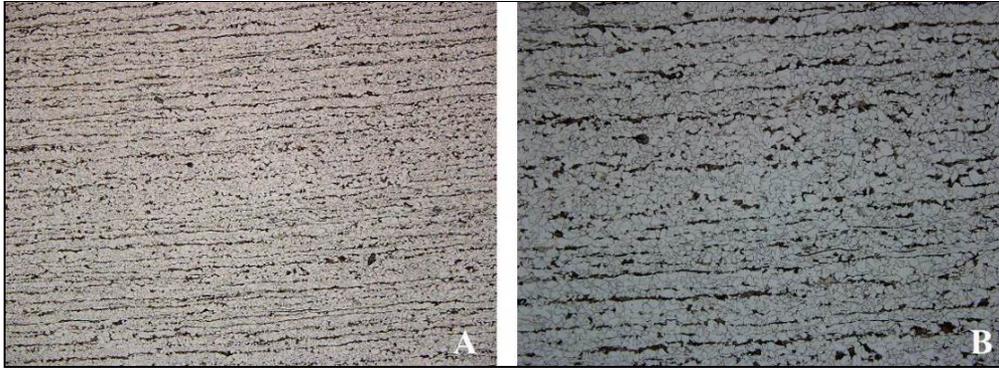


Figura 5.2 – Metalografia (A) aumento de 100x (B) aumento de 200x.

5.2. Teste de tração

As propriedades sob tração podem variar conforme o modo de preparação dos CPs, o ambiente e a velocidade do teste. Portanto estas variáveis deverão ser cuidadosamente controladas para garantir uma medição precisa destas propriedades. Foram usinados CPs com geometria cilíndrica segundo a norma ASTM E 8M [56], conforme Figura 5.3.

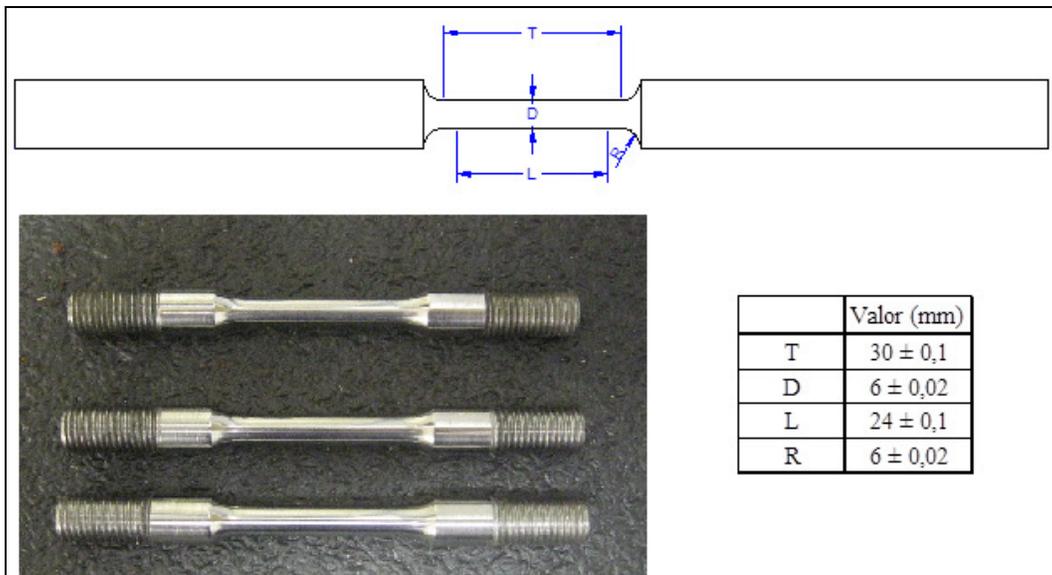


Figura 5.3 – C.P. tração segundo a norma ASTM E 8M[56].

Os ensaios foram feitos em uma máquina INSTRON 8872 com capacidade de 25 kN no Instituto Nacional de Tecnologia (INT). Nas Figuras 5.4 e 5.5 são mostradas a máquina de teste e uma representação da sequência do teste.



Figura 5.4 – Máquina de tração INSTRON 8872.



Figura 5.5 – Sequência do teste.

Foram testados três CPs idênticos com o objetivo de medir : resistência ao escoamento (S_y), resistência à tração (S_u) e módulo de elasticidade (E). Na Figura 5.6 são mostradas as curvas tensão vs. deformação de engenharia para os três CPs testados.

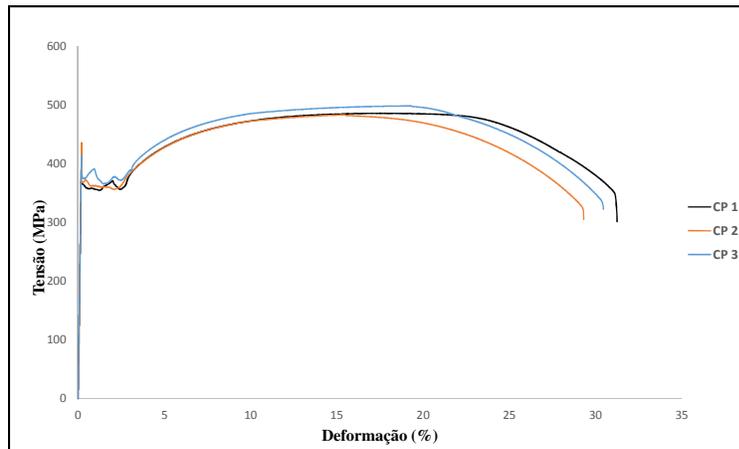


Figura 5.6 – Curvas tensão vs. deformação.

As propriedades medidas e suas médias são mostradas na tabela 5.1.

	S_y (MPa)	S_u (MPa)	E (GPa)
CP 1	363,3	486,4	218,5
CP 2	371,4	484,1	218,2
CP 3	374,5	499,1	217,6
Média	369,7	489,8	218,1
Desvio Padrão	4,7	6,6	0,4

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas.

As curvas foram ajustadas mediante a relação de Ramberg Osgood para assim obter os coeficientes de encruamento do material segundo a seguinte expressão :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + k \left(\frac{\sigma}{E} \right)^n \quad (5.1)$$

Onde $n = 5,617$ e $k = 5,03 \cdot 10^{13}$

5.3. Testes de tenacidade à fratura

5.3.1. Corpos de Prova (CPs)

Os CPs usados para medir as curvas J_R do material estudado foram o SE(B) e o SE(T). Os CPs SE(B) foram usinados segundo critérios da norma ASTM 1820 e os CPs SE(T) seguindo as recomendações das principais bibliografias já mencionadas, a similitude em geometria com os SE(B), e as capacidades das máquinas de teste disponíveis. Nas Figuras 5.7 e 5.8 são apresentadas as dimensões dos CPs e na Figura 5.9 mostra-se os CPs usinados.

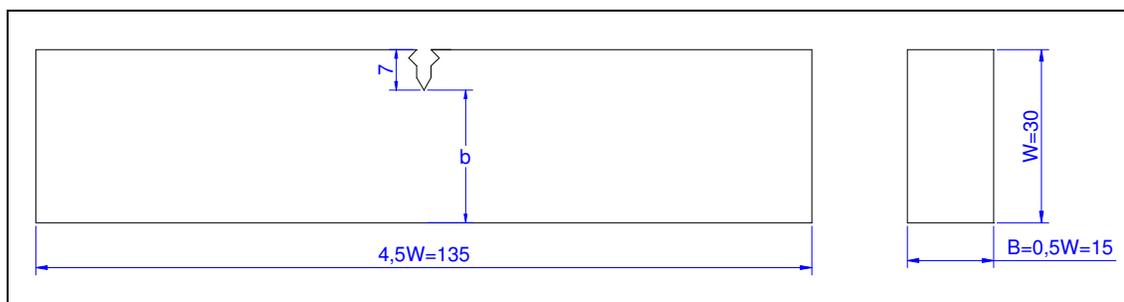


Figura 5.7 – Dimensões do CP tipo SE(B) – dimensões em mm.

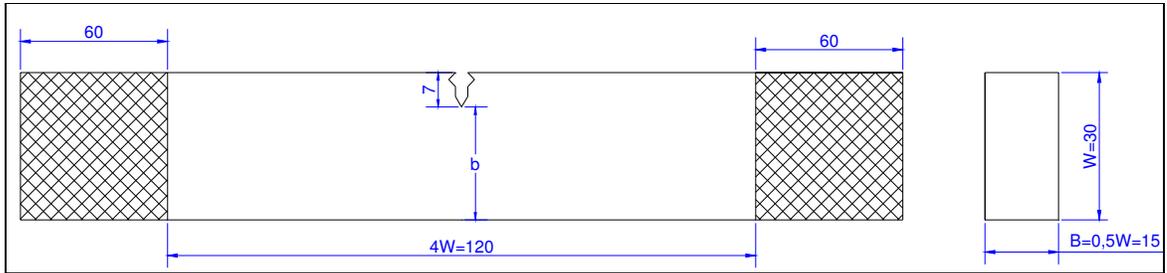


Figura 5.8 – Dimensões do CP tipo SE(T) – dimensões em mm.

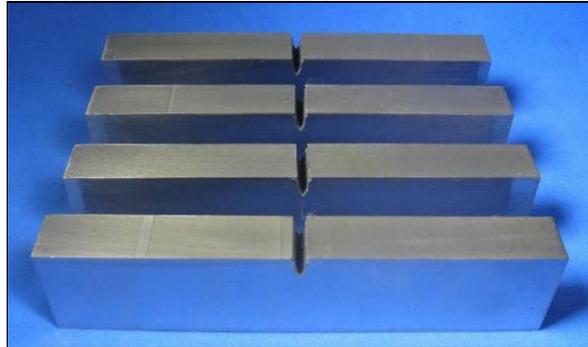


Figura 5.9 – CPs usinados.

Foram usinados nove CPs SE(B) , os quais foram testados variando a relação de tamanho de trinca inicial (considerando trinca rasa e fora do padrão das normas $a/W = 0,3$ e $0,4$ e trinca profunda ou padrão $a/W = 0,5$). Do tipo SE(T) foram usinados seis CPs com $a/W = 0,4$ e $0,5$. A nomenclatura dos CPs é mostrada na Tabela 5.2.

Tipo de CP	Denominação	a/W
SE(B)	SEB-03-01	0,3
	SEB-03-02	0,3
	SEB-03-03	0,3
	SEB-04-01	0,4
	SEB-04-02	0,4
	SEB-04-03	0,4
	SEB-05-01	0,5
	SEB-05-02	0,5
	SEB-05-03	0,5
SE(T)	SET-04-01	0,4
	SET-04-02	0,4
	SET-04-03	0,4
	SET-05-01	0,5
	SET-05-02	0,5
	SET-05-03	0,5

Tabela 5.1 – Nomenclatura dos CPs.

5.3.2. Pré-trinca de fadiga

Os CPs foram pré-trincados por fadiga em flexão de três pontos até atingirem a relação requerida (tabela 5.1). A máquina usada foi a MTS Landmark com capacidade de 25 kN. A carga máxima de pré-trincamento foi calculada segundo a norma ASTM 1820 da seguinte forma:

$$P_m = \frac{0,5Bb_0^2\sigma_Y}{S} \quad (5.2)$$

A razão entre a carga máxima e a mínima aplicada em um ciclo foi mantida em 0,1 durante o pré-trincamento.

$$\frac{P_{\min}}{P_{\max}} = 0,1 \quad (5.3)$$

A montagem do ensaio é mostrada na Figura 5.10 e um detalhe da pré-trinca na Figura 5.11. O pré-trincamento foi controlado pela variação do fator de intensidade de tensão (ΔK_I), segundo a geometria usada é mostrada a expressão para o cálculo de ΔK_I :

$$\Delta K_I = \frac{6\Delta P}{t\sqrt{W}} \cdot \frac{\sqrt{a/W}}{\left(1+2\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right)^{1,5}} \cdot \left\{ 1,99 - \left(\frac{a}{W}\right)\left(1-\frac{a}{W}\right) \left[2,15 - 3,93\frac{a}{W} + 2,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right] \right\} \quad (5.4)$$

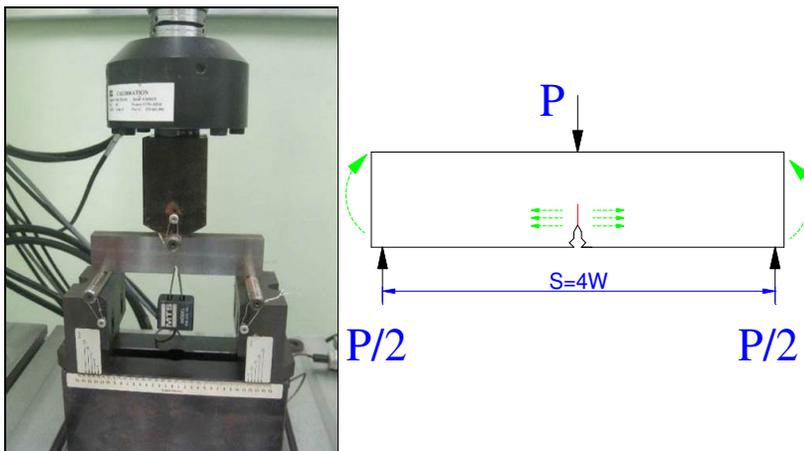


Figura 5.10 – Montagem do CP para pré-trincamento

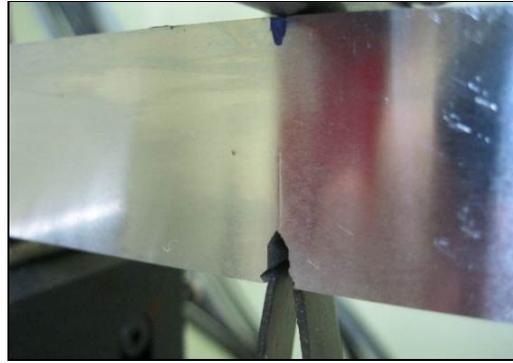


Figura 5.11 – Detalhe da pré-trinca.

A tela de acompanhamento do pré-trincamento é apresentada na Figura 5.12.

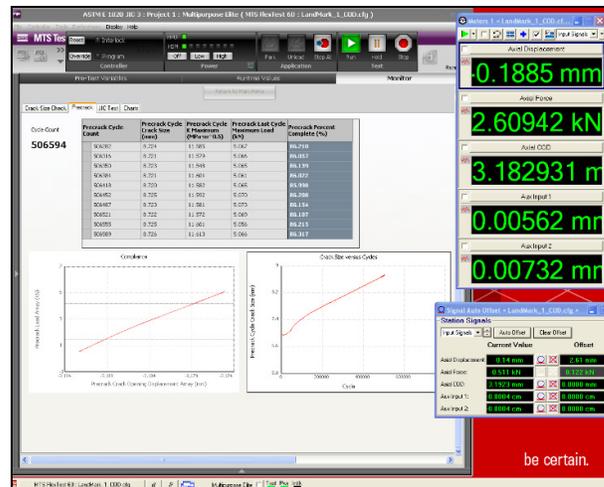


Figura 5.12 – Tela de acompanhamento do pré-trincado.

5.3.3. Entalhes Laterais (*Side Grooves*)

Após o pre-trincado, foram usinados entalhes laterais nos CPs (Figura 5.13) usando uma máquina W-EDM (Wire Electrical Discharge Machine - eletro erosão a fio) com um fio de 0,25 mm de diâmetro. A redução da espessura foi feita obedecendo a relação $B_N = 0.7B$. O ângulo interno do entalhe lateral deve ser menor do que 90° . Deixou-se um CP sem entalhe lateral para cada tipo de geometria (SEB e SET), com o objetivo de comparar os resultados nos valores da tenacidade com e sem entalhe. A Figura 5.14 mostra o conjunto de CPs com entalhe lateral e os CPs sem entalhe.

5.3.4. Testes CPs SE(B)

Os CPs foram carregados monotonicamente à fratura sob controle de deslocamento, para obtenção das curvas P vs COD (abertura da trinca). O ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E1820 usando o método de flexibilidade no descarregamento. O deslocamento da boca do entalhe foi medido com um extensômetro tipo clip gage com capacidade de 12 mm, como mostrado na Figura 5.15.

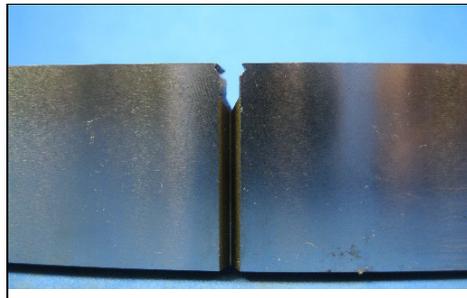


Figura 5.13 – CP com entalhe lateral.



Figura 5.14 – Conjunto de CPs entalhados lateralmente.

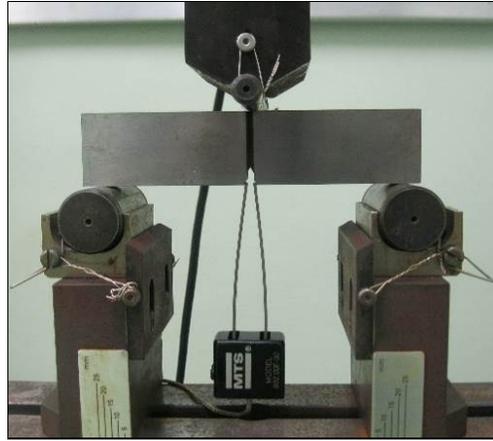


Figura 5.15 – Posicionamento do clip gage no CP.

Um dos principais problemas no treinamento para os testes foi a disponibilidade de extensômetros tipo clip gage, devido a isso foi desenvolvido um método alternativo para medição dos deslocamentos nos testes de tenacidade. A Metodologia de Processamento de Imagens (DIC) foi analisada e validada para medição em testes de tenacidade, isso permitiu realizar o treinamento no laboratório quando os extensômetros não estavam disponíveis. No apêndice B é relatada esta metodologia e a sua correspondente validação.

A máquina usada foi uma MTS 810 com capacidade de 100 kN. O programa para controle e processamento de dados usado foi o MTS Multipurpose Elite (mpe). Os parâmetros usados no teste de obtenção da curva J_R , são apresentados na Tabela 5.2.

Intervalo de COD	0,2 mm
Porcentagem de descarregamento	20%
Número de descarregamentos	3
Taxa de deslocamento	0,01 mm/s
Taxa de descarregamento	0,3 kN/s
Taxa de carregamento	0,3 kN/s
Taxa de declive de carregamento	0,3 kN/s
Máximo COD	12 mm
Frequência de captura de dados	50 Hz

Tabela 5.2 – Parâmetros de teste.

Na Figura 5.16 são mostradas as curvas P vs COD dos CPs SEB 05-01, SEB 05-02 e SEB05-03 , os quais tem uma relação $a/W = 0,5$, sendo que o SEB 05-03 foi testado sem entalhe lateral.

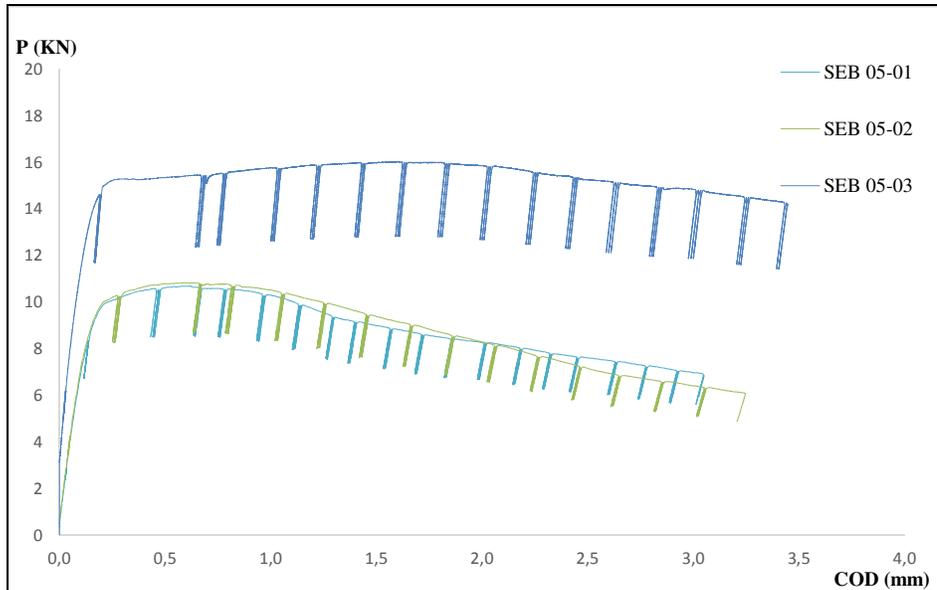


Figura 5.16 – Curva P vs. COD ($a/W=0,5$).

Pode ser observada na Figura maiores cargas no CP sem canal lateral, essa diferença é esperada já que o CP tem 30% a mais de espessura. A Figura 5.17 mostra a comparação entre as zonas plásticas do CP SEB 05-02 e SEB 05-03 em um instante comum dos testes. Pode ser observado também uma boa repetitividade entre os CPs com geometria idêntica. Os ensaios para os CPs com esta relação de tamanho de trinca (trinca profunda) foram desenvolvidos sem maior dificuldade.

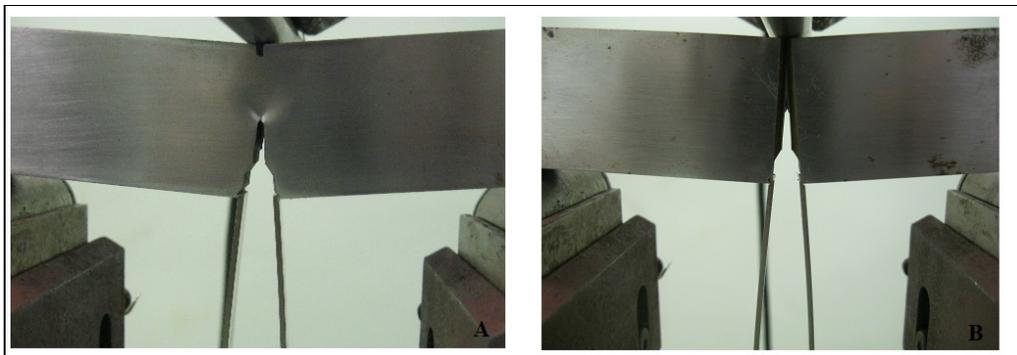


Figura 5.17 – Zona plástica CPs A) SEB 05-02 e B) SEB 05-03.

Na Figura 5.18 são mostradas as curvas P vs. COD dos CPs com $a/W = 0,4$, esta relação de tamanho de trinca encontra-se fora do considerado pelas normas

(0,45-0,55). Os testes foram mais trabalhosos devido o fato dos CPs acumularem maior deformação plástica na ponta da trinca. Assim as curvas obtidas apresentaram comportamento irregular no descarregamento (não foram obtidos ciclos igualmente espaçados nem uma boa quantidade deles). Observa-se o CP SEB 04-01, no qual só se conseguiu realizar 6 ciclos antes da queda brusca da carga e conseqüente parada de teste. Um comportamento similar obteve-se no teste do CP SEB 04-03, o qual permitiu até 8 ciclos, porém o CP quebrou antes da parada do teste, o que impossibilitou a medição do avanço estável de trinca. Já o CP SEB 04-02 apresenta uma curva mais contínua até o final do carregamento, nesse CP foi diminuído o intervalo de descarregamento de 0,2 mm para 0,1mm, com a finalidade de se obter mais ciclos de descarga. Este último teste mostrou-se mais estável. As curvas mostram uma mesma tendência e repetitividade nos valores de carga e deslocamento.

Na Figura 5.19 são mostradas as curvas P vs COD com $a/W = 0,3$. Elas apresentaram um comportamento similar às curvas com $a/W = 0,4$, sendo que neste caso o CP SEB 03-03 só conseguiu fazer 2 ciclos antes de quebrar, o CP SEB 03-02 fez 9 ciclos antes da queda brusca de carga e finalmente o CP SEB 03-01 apresentou um comportamento estável.

A Figura 5.20 mostra as curvas dos 9 testes realizados, pode-se observar um aumento das cargas conforme diminui o tamanho da trinca.

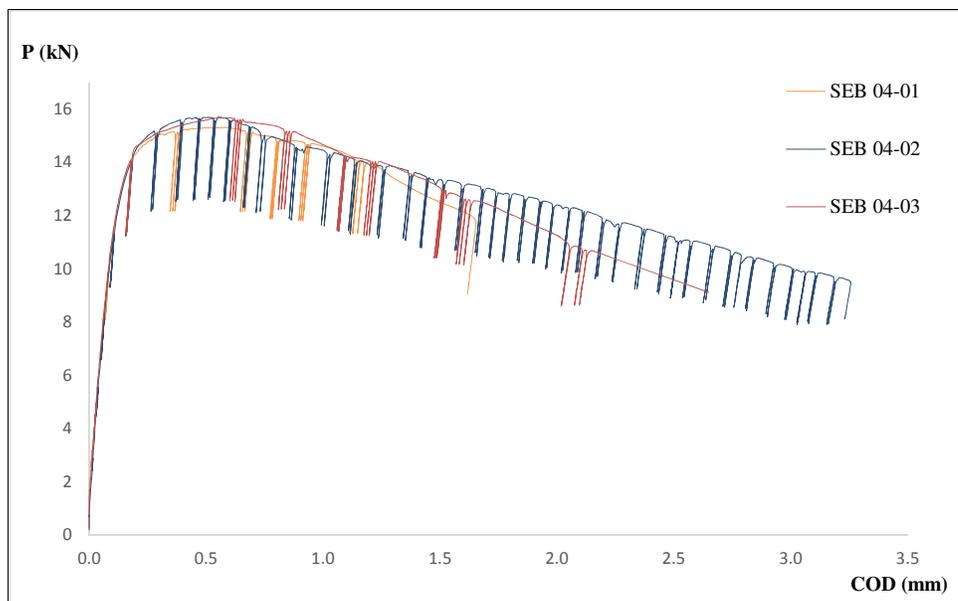


Figura 5.18 – Curva P vs. COD ($a/W=0,4$).

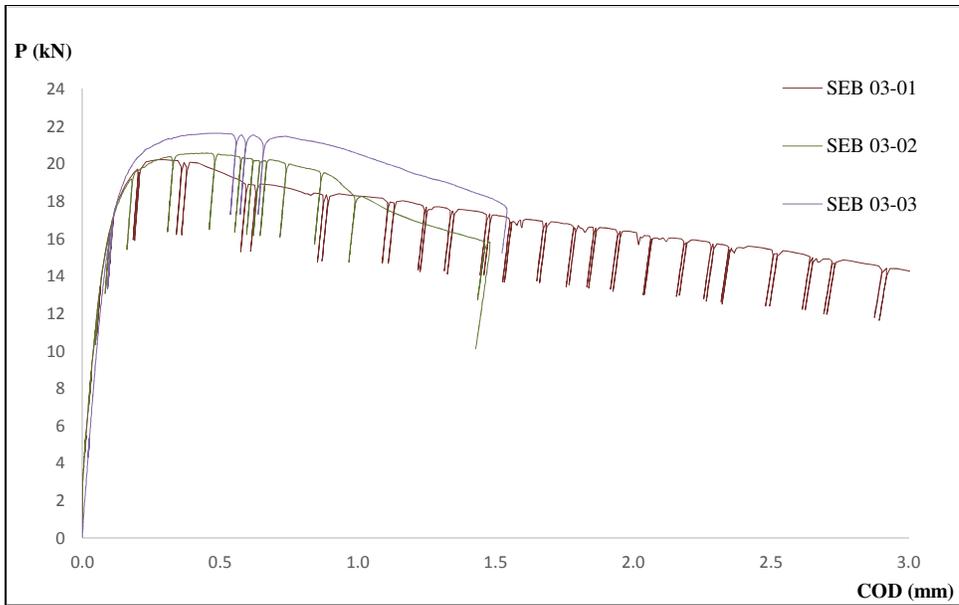


Figura 5.19 – Curva P vs. COD ($a/W=0,3$).

A Figura 5.21 mostra as três curvas mais representativas, considerando cada um dos tamanhos de trinca avaliados. Nessa Figura fica muito mais claro o aumento dos valores de carga em função ao tamanho da trinca.

A Figura 5.22 mostra uma imagem representativa da propagação estável da trinca durante o teste no CP SEB 03-01.

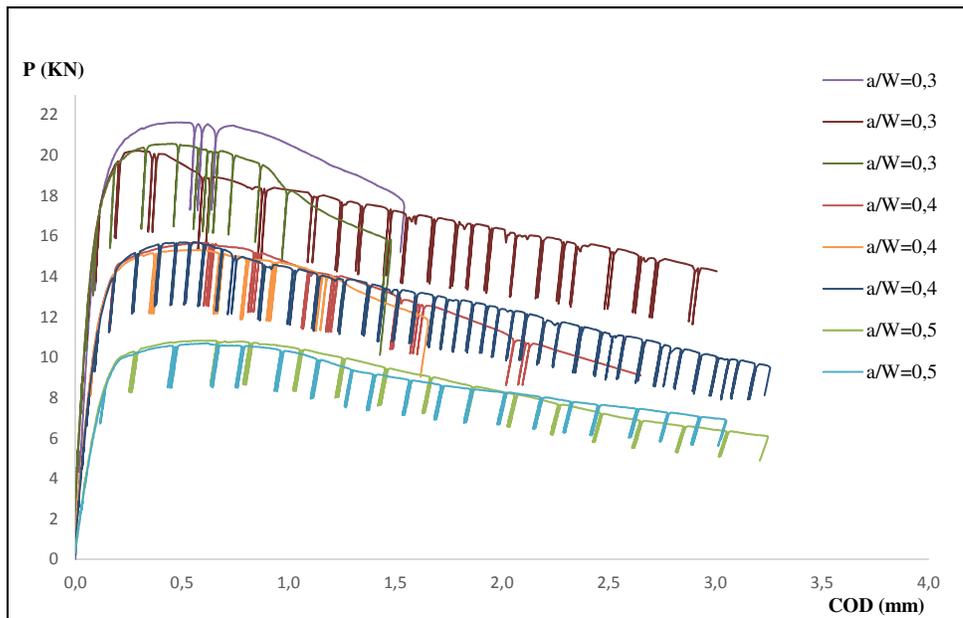


Figura 5.20 – Curva P vs. COD totais.

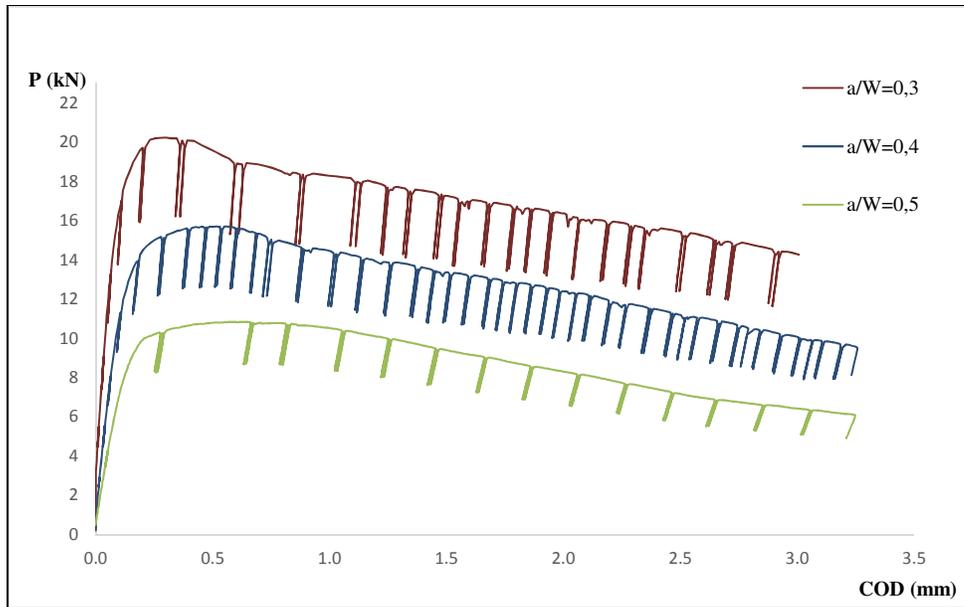


Figura 5.21 – Curvas P vs. COD para CPs mais representativos.

5.3.5. Testes CPs SE(T)

Os testes para os CPs SE(T) não foram baseados em nenhuma norma já que esses CPs não são normalizados. Eles foram realizados seguindo a experiência com os testes dos CPs em flexão e as recomendações da principais bibliografias já mencionadas. Os CPs foram carregados por meio de garras hidráulicas, e o COD foi medido com um clip gage idêntico ao usado nos testes de flexão, como mostrado na Figura 5.23. A máquina usada foi a mesma dos testes SE(B).



Figura 5.22 – Propagação estável da trinca.

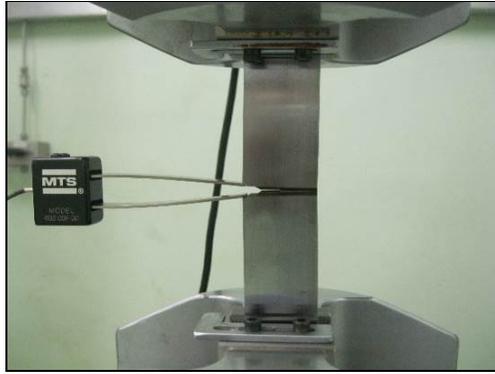


Figura 5.23 – Montagem do teste SE(T).

Os parâmetros usados no teste foram os mesmos dos testes SE(B) com a variação do intervalo de COD que foi alterado de 0,2 a 0,1 mm. A Figura 5.24 mostra as curvas P vs. COD para os CPs com $a/W = 0,5$. Podem ser notadas cargas da ordem de 70 kN para os dois primeiros CPs com uma repetitividade boa. O terceiro CP (SET 05-03) apresenta maiores valores de carga devido a não contar com entalhe lateral. Há uma menor restrição plástica nos CPs SE(T) em comparação aos SE(B), porém o deslocamento da boca do entalhe é menor nestes casos (da ordem de 1,5 mm em comparação aos 3,5 mm dos SEB). A Figura 5.25 mostra a influência do entalhe lateral nas zonas plásticas desenvolvidas nos CPs SET 05-02 e SET 05-03.

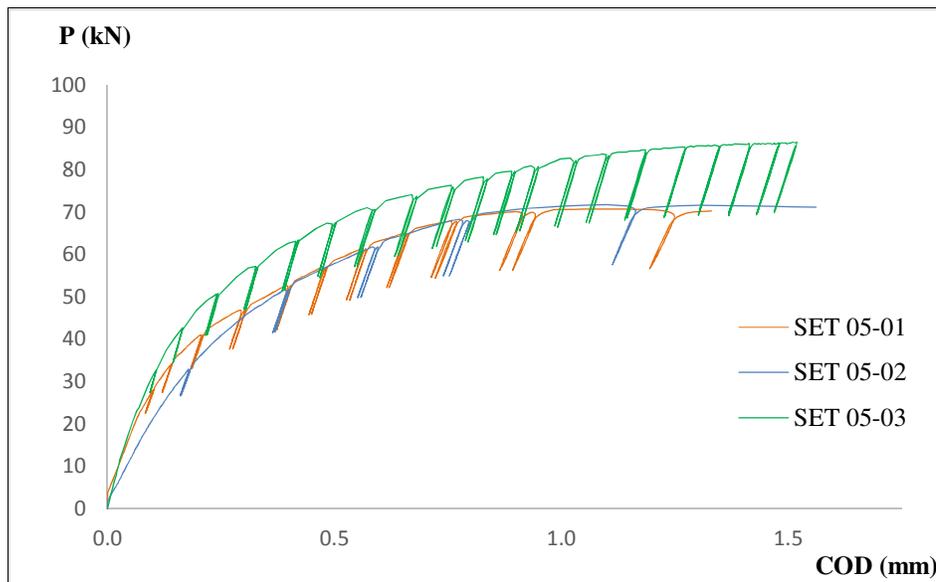


Figura 5.24– Curva P vs. COD ($a/W=0,5$).

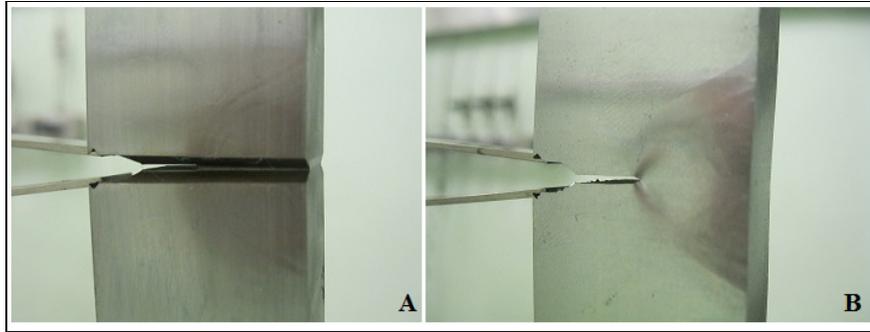


Figura 5.25– Zona plástica CPs A) SET 05-02 e B) SET 05-03.

A Figura 5.26 mostra as curvas P vs. COD para $a/W = 0,4$. A tendência foi de maiores cargas em comparação às curvas anteriores (da ordem de 90 kN). O CP SET 04-01 foi perdido devido a um desligamento inesperado da bomba hidráulica da máquina, talvez ocasionado pela sobreexigência nos testes perto da sua capacidade máxima (100 kN) somado ao tempo de funcionamento. Os testes realizados com ambos os tamanhos de trinca (0,4 e 0,5) foram desenvolvidos sem maior dificuldade.

A Figura 5.27 mostra as 5 curvas de testes realizados em diferentes tamanhos de trinca para os CPs SE(T), nesta Figura pode ser notado o aumento de carga conforme diminui o tamanho de trinca. A Figura 5.28 mostra as duas curvas mais representativas considerando cada um dos tamanhos de trinca avaliados.

A Figura 5.29 mostra a propagação estável da trinca durante o teste no CP SET 04-02.

Finalmente na Figura 5.30 são mostradas as curvas de todos os CPs testados. Como já mencionado, os CPs SET suportaram carregamentos maiores, da ordem de 90 kN, comparados com os CPs do tipo SEB, da ordem de 20 kN.

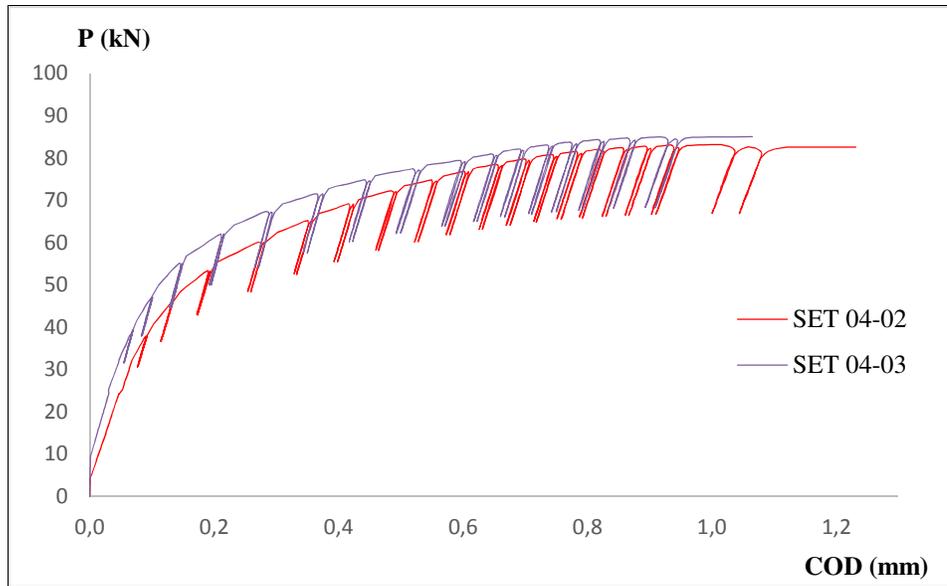


Figura 5.26– Curva P vs. COD ($a/W=0,4$).

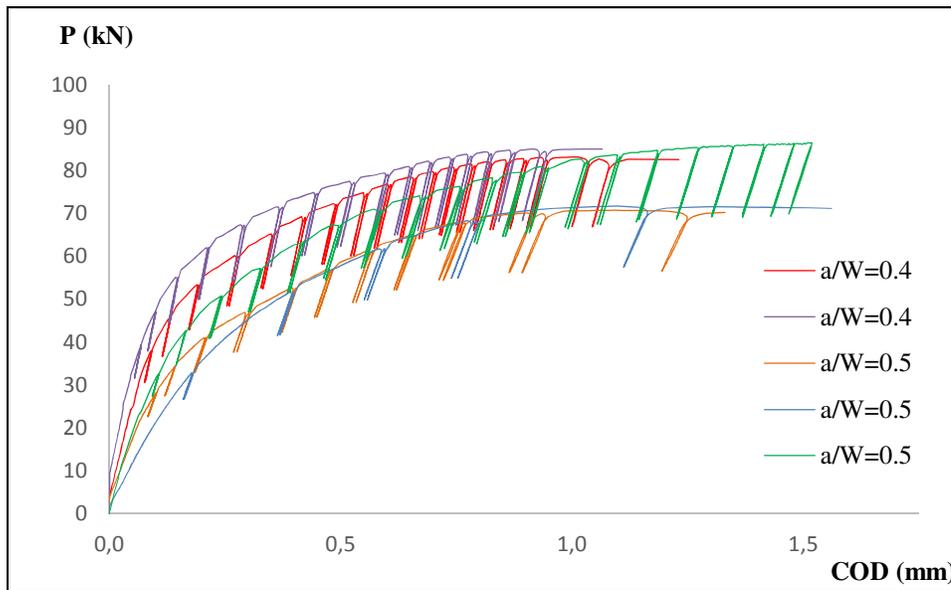


Figura 5.27– Curva P vs. COD totais.

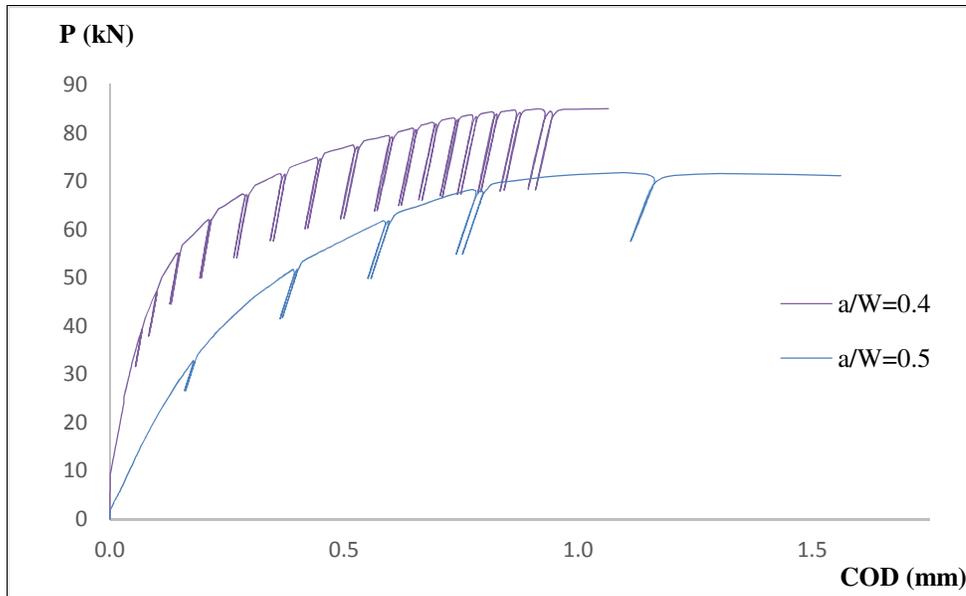


Figura 5.28– Curvas P vs. COD para CPs mais representativos.

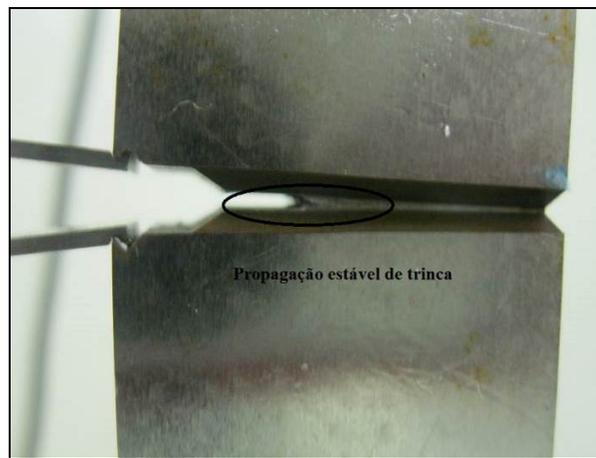


Figura 5.29 – Propagação estável da trinca.

5.3.6. Fratura dos CPs

Finalizados os testes, os CPs foram submersos em um recipiente contendo nitrogênio líquido (Figura 5.31), e após o equilíbrio térmico eles foram quebrados com um martelo (Figura 5.32) para diferenciar a propagação estável de trinca e medi-la corretamente após o teste. Após a fratura, foram medidos os comprimentos das pré-trincas e das trincas propagadas de forma estável no teste. A Figura 5.33 mostra o esquema para medição dos tamanhos da trinca para um CP. As imagens das superfícies de fratura foram realizadas usando um estéreo microscópi Olympus modelo SZX16 e são mostradas no apêndice A.

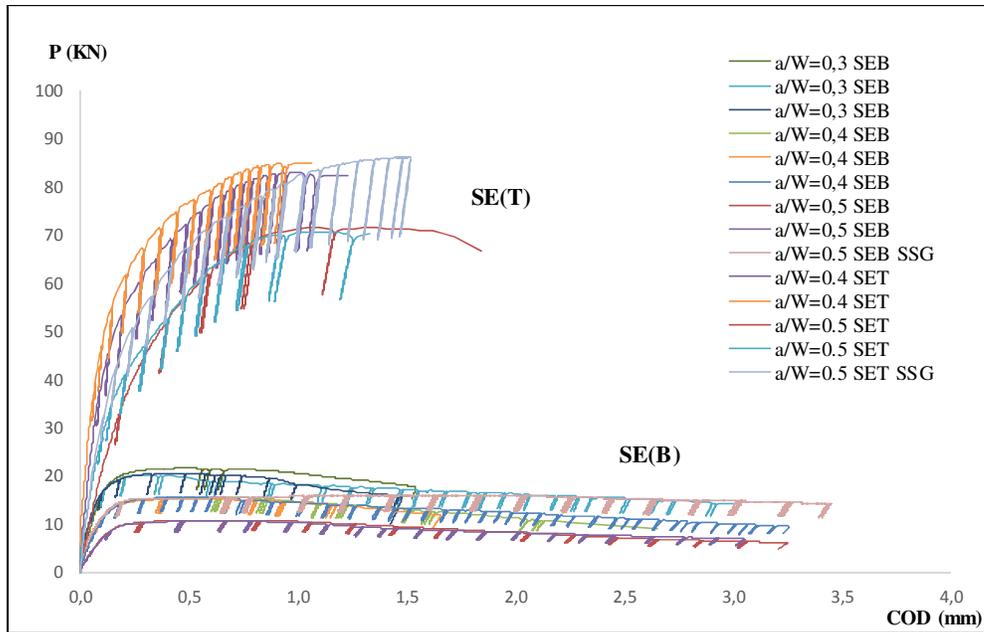


Figura 5.30 – Curvas P vs. COD totais.



Figura 5.31 – CPs submersos em nitrogênio líquido para fratura.

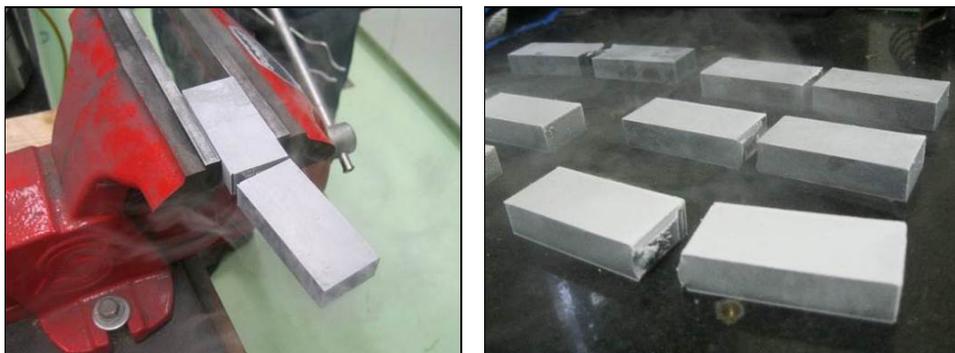


Figura 5.32 – Fratura dos CPs após resfriamento.

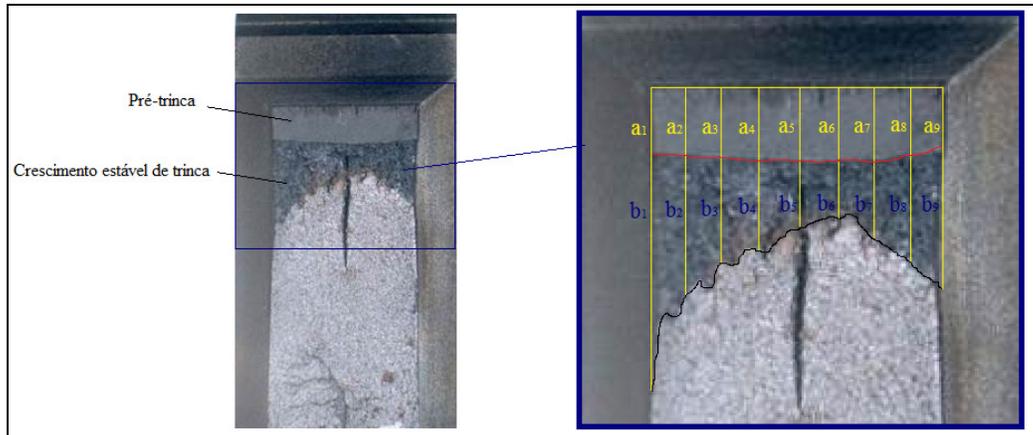


Figura 5.33 – Esquema da medição dos comprimentos das trincas.

5.3.7. Curvas J_R

A Figura 5.34 mostra as curvas J_R para os CPs SEB 03-01 e SEB 03-02, obtidas pelo método de flexibilidade. As curvas apresentam uma diferença na inclinação. Já a Figura 5.35 apresenta as curvas para os CPs com $a/W = 0,4$.

A Figura 5.36 apresenta as curvas J_R para o caso de $a/W = 0,5$, as quais apresentam boa repetitividade para os CPs com canal lateral (SEB 05-01 e SEB 05-02). Um aumento da tenacidade verifica-se no CP SEB 05-03, devido à sua menor restrição plástica por não contar com canal lateral.

A Figura 5.37 mostra o total das curvas J_R , nela pode ser verificada com clareza a influência do tamanho da trinca na inclinação das curvas, assim como também a influência do canal lateral.

As curvas J_R para os CPs SE(T) com $a/W = 0,4$ são mostradas na Figura 5.38. Elas apresentam uma diferença pequena na inclinação da parte inicial.

A Figura 5.39 mostra os CPs com $a/W = 0,5$, com a mesma tendência de carga e deslocamento. Nesses CPs não se vê uma influência do canal lateral, isto pode ser devido ao fato que os CPs SE(T) já contam com menor restrição devido ao tipo de carregamento.

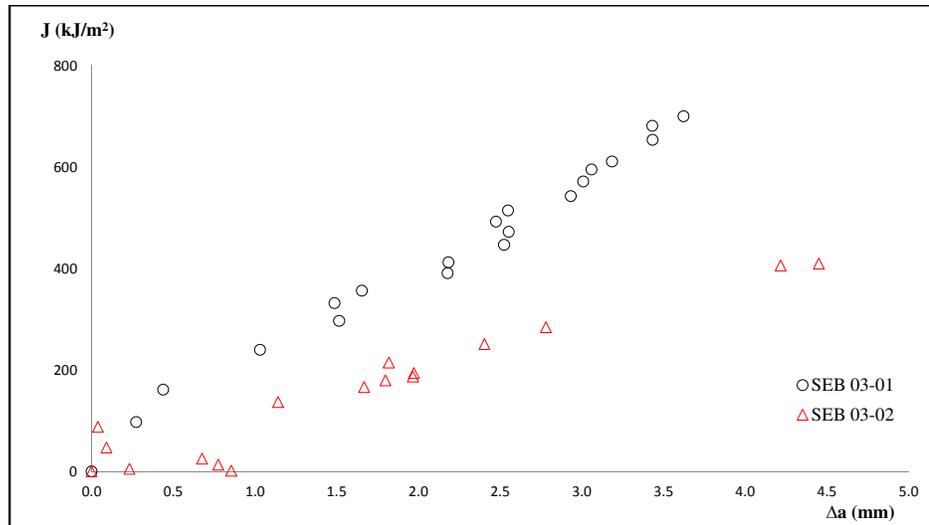


Figura 5.34 – Curva J_R dos CPs SE(B) $a/W=0,3$.

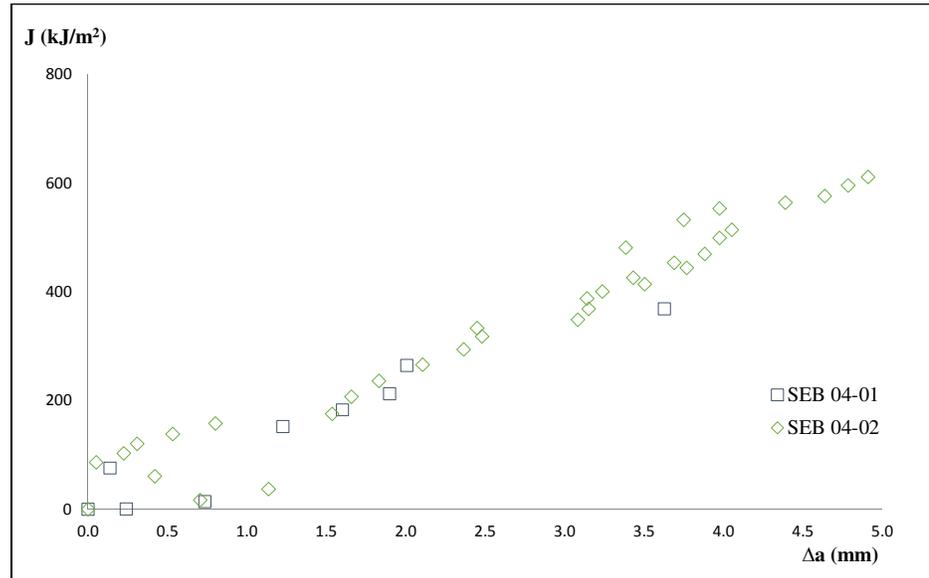


Figura 5.35 – Curva J_R dos CPs SE(B) $a/W=0,4$.

A Figura 5.40 mostra o conjunto de todos os testes, onde pode-se ver claramente a pouca influência do tamanho da trinca inicial nas curvas J_R : a tendência e a inclinação de todas (exceto a SET 04-03) são quase as mesmas, sem considerar as variações de tamanho de trinca ou entalhe lateral.

A Figura 5.41 apresenta o conjunto de todas as curvas J_R , em vermelho são mostradas as curvas SE(T) e em preto as SE(B). Dos resultados pode-se concluir que o início das curvas (que é a região onde pode ser calculado o J de iniciação) não é influenciado pelo tipo de CP, tamanho de trinca inicial, canal lateral ou

algum outro parâmetro de restrição à deformação plástica. A tendência de curva é sim influenciada em sua segunda região por estes parâmetros.

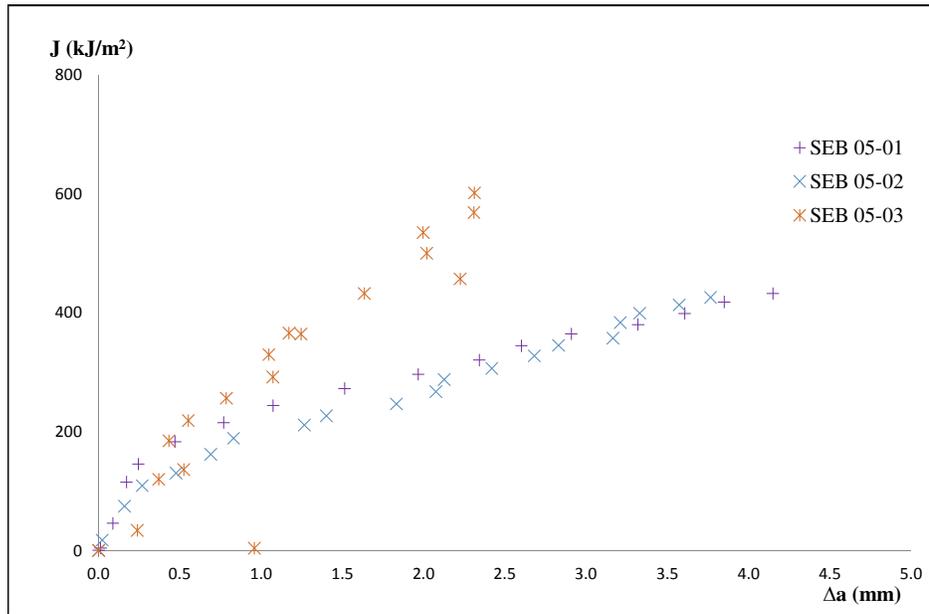


Figura 5.36 – Curva J_R dos CPs SE(B) $a/W=0,5$.

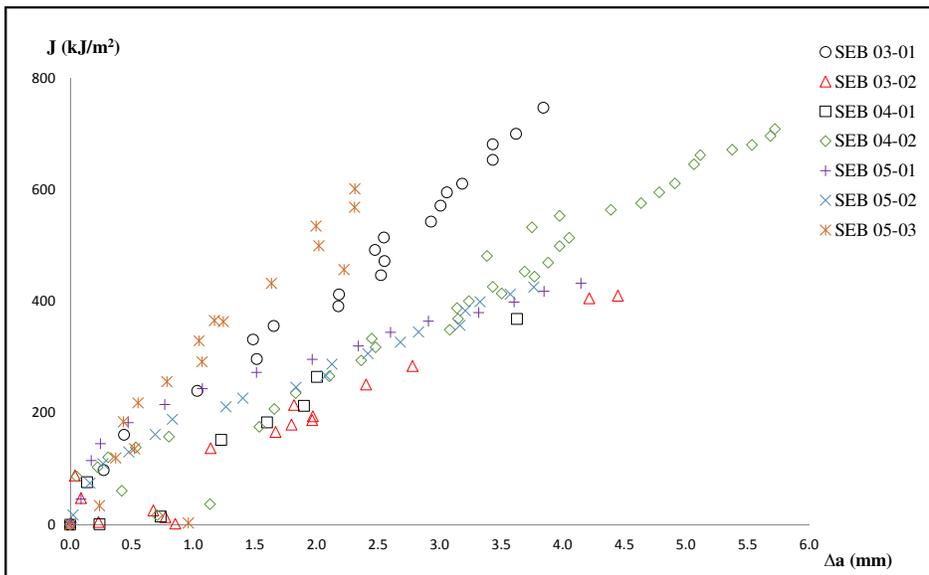


Figura 5.37 – Curvas J_R SE(B) totais.

As tabelas 5.3 e 5.4 mostram as propriedades medidas para cada um dos CPs testados, as médias considerando tamanho de trinca inicial e a média total.

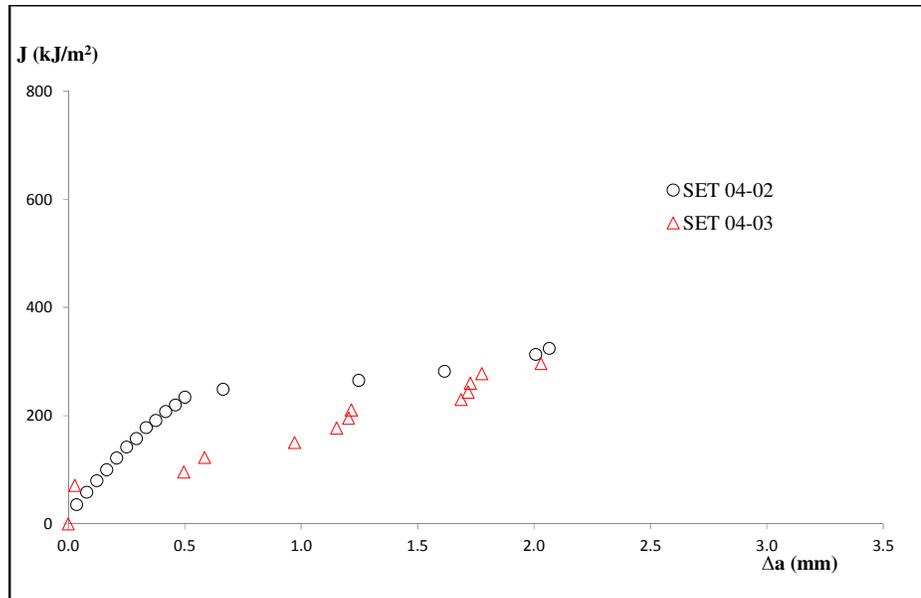


Figura 5.38 – Curva J_R dos CPs SE(T) $a/W=0,4$.

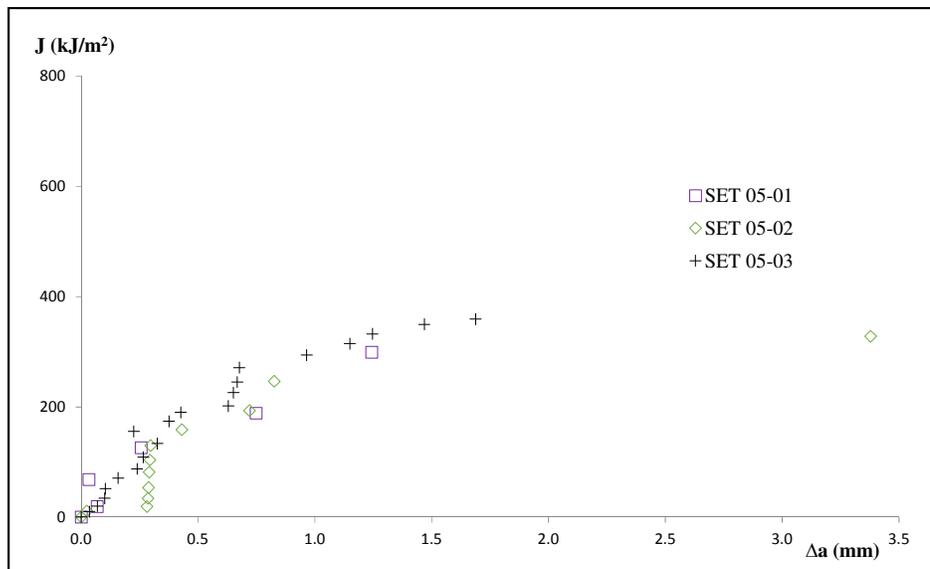


Figura 5.39 – Curva J_R dos CPs SE(T) $a/W=0,5$.

	SEB						
	SEB 03-01	SEB 03-02	SEB 04-01	SEB 04-02	SEB 05-01	SEB 05-02	SEB 05-03
$J_{IC-SE(B)} - kJ/m^2$	112,1	135,6	101,2	92,9	168,9	110,7	131,7
$K_{IC-SE(B)} - MPa.m^{1/2}$	163,9	180,3	155,8	149,3	201,2	162,9	177,7
Curva $J_R - kJ/m^2$	$J_R = 251,09\Delta a^{0,7271}$	$J_R = 183,79\Delta a^{0,296}$	$J_R = 170,13\Delta a^{0,4528}$	$J_R = 199,03\Delta a^{0,6464}$	$J_R = 240,45\Delta a^{0,382}$	$J_R = 198,16\Delta a^{0,5239}$	$J_R = 295,9\Delta a^{0,777}$
$J_{IC} \text{ Média } a/W - kJ/m^2$	123,9		97,1		137,1		
$K_{IC} \text{ Média } a/W - MPa.m^{1/2}$	172,1		152,5		180,6		
$J_{IC} \text{ Média Total} - kJ/m^2$	121,9						
$K_{IC} \text{ Média Total} - MPa.m^{1/2}$	170,1						

Tabela 5.3 – Propriedades mecânicas CPs SEB.

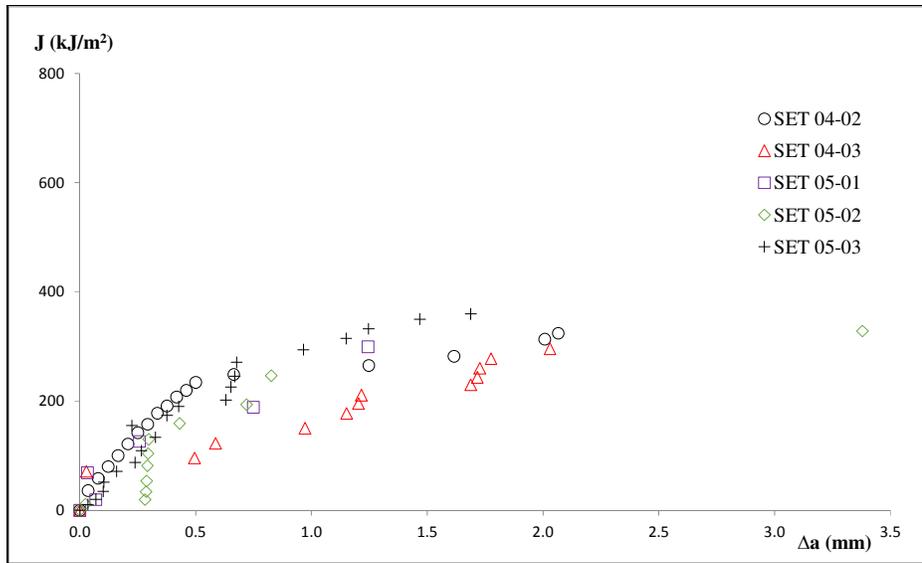


Figura 5.40 – Curvas J_R SE(T) totais.

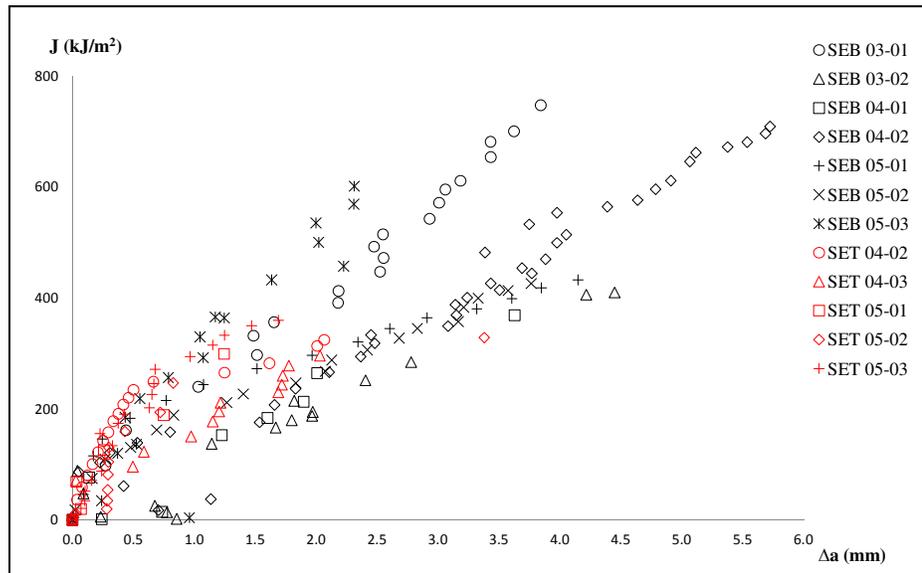


Figura 5.41 – Curvas J_R totais.

	SET				
	SET 04-02	SET04-03	SET 05-01	SET 05-02	SET 05-03
$J_{IC-SE(T)} - kJ/m^2$	195,7	131,4	146,6	139,4	186,7
$K_{JIC-SE(T)} - MPa.m^{1/2}$	216,6	177,5	187,5	182,8	211,5
Curva $J_R - kJ/m^2$	$J_R = 257.54\Delta a^{0.3235}$	$J_R = 186.43\Delta a^{0.3359}$	$J_R = 246.53\Delta a^{0.5232}$	$J_R = 216.31\Delta a^{0.4328}$	$J_R = 290.08\Delta a^{0.5041}$
J_{IC} Média $a/W - kJ/m^2$	163,5		157,6		
K_{JIC} Média $a/W - MPa.m^{1/2}$	197,0		193,9		
J_{IC} Média Total - kJ/m^2	160,0				
K_{JIC} Média Total - $MPa.m^{1/2}$	195,2				

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas CPs SET.

5.3.8. Análise Fratográfica

Nas Figuras 5.42 – 5.44 são mostradas as fratografias observadas em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das superfícies do CP SEB 05-02. Na Figura 5.42 pode-se diferenciar claramente três regiões: região de fadiga (pré-trincado), região de propagação dúctil e região de fratura frágil (forçada com nitrogênio líquido). Na Figura 5.43 pode ser vista a região de propagação dúctil da trinca durante o teste. É notada claramente a formação de *dimples*, que caracterizam a fratura dúctil de um material. Na Figura 5.44 mostra-se a transição de dúctil para frágil (quebra de CP). Analogamente são mostradas as fratografias do CP SET 04-03 nas Figuras 5.45-5.47. As Figuras das fratografias de todos os CPs encontram-se no apêndice A.

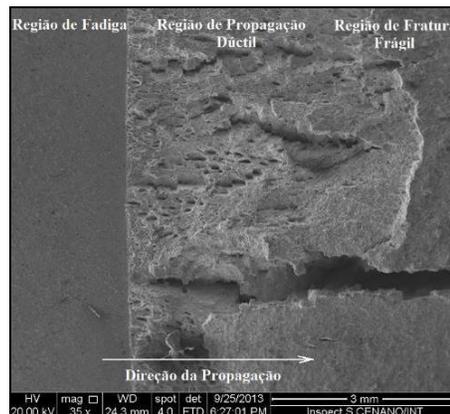


Figura 5.42 – Fratografia # 1 da superfície CP SEB 05-02.

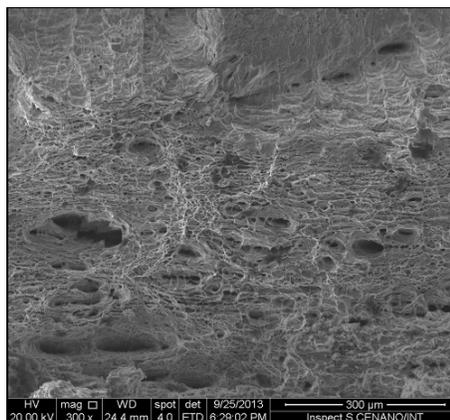


Figura 5.43 – Fratografia # 2 da Superfície CP SEB 05-02.

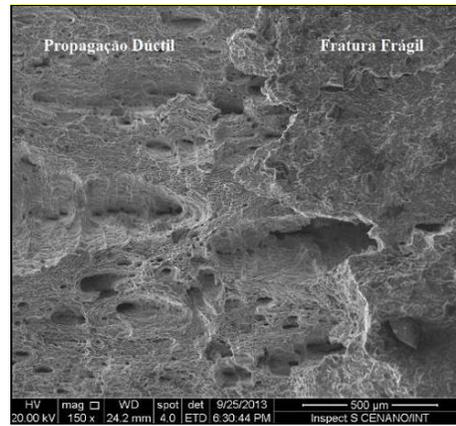


Figura 5.44 – Fratografia #3 da superfície do CP SEB 05-02.

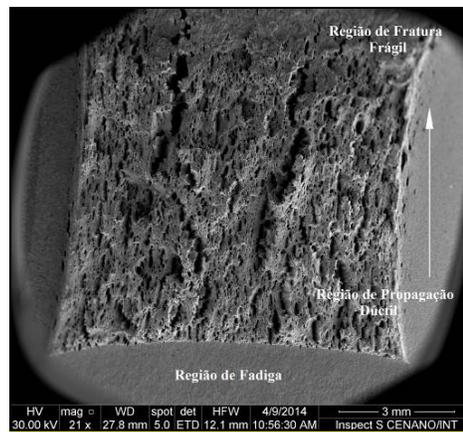


Figura 5.45 – Fratografia #1 da superfície do CP SET 04-03.

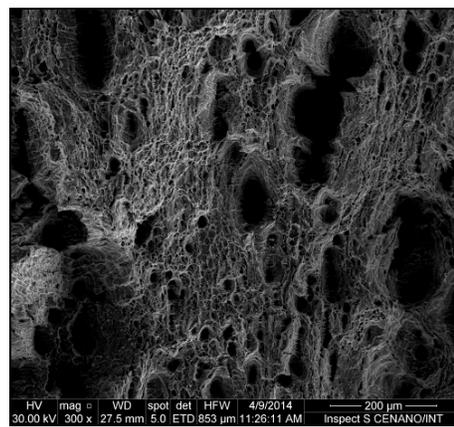


Figura 5.46 – Fratografia #2 da superfície do CP SET 04-03.

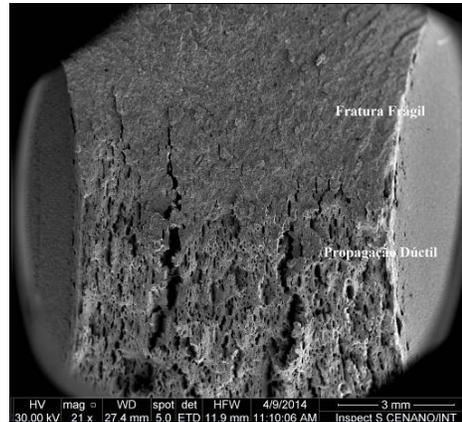


Figura 5.47 – Fratografia #3 da superfície do CP SET 04-03.

5.4. Simulações dos testes de Tenacidade

Com o objetivo de reproduzir o resultados obtidos experimentalmente nos testes de tenacidade foi calibrado o parâmetro f_0 associado ao modelo de Gurson-GNT contra os dados dos ensaios, através de análises de Elementos Finitos (EF) incorporando a técnica de Células Computacionais. As análises foram realizadas no software comercial ABAQUS 6.12. Foram construídos modelos com diferentes tamanhos de trinca inicial ($a/W = 0,5; 0,4$ e $0,3$) em geometrias idênticas aos CPs tipo SE(B) testados em laboratório. A Figura 5.48 mostra a geometria do CP usado na simulação, ele representa o CP do tipo SE(B) usado nos testes em laboratório.

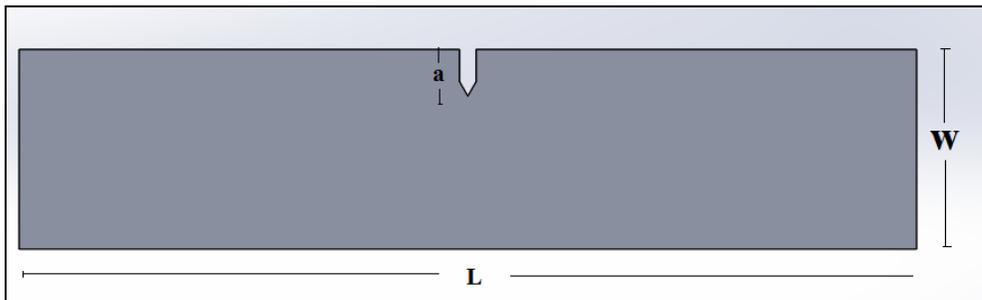


Figura 5.48 – Geometria do CP usado no modelo.

Para a redução do custo computacional, os modelos construídos consideram meia simetria. Em análises que envolvem grandes deformações, como o caso de propagação estável de trinca por rasgamento dúctil, é aconselhável que a ponta da

trinca seja representada por um raio finito de elementos, ou que já apresente uma pequena curvatura (blunting) [28] .

O modelo considerou regime de deformação plana em 2D, tendo sido adotado o elemento CPE4R (4 nós, integração reduzida). A tabela 5.5 apresenta o número total de elementos e nós empregados em cada modelo. A malha de um dos modelos é mostrada na Figura 5.49

Modelo (a/W)	Número de elementos	Número de nós
0,3	6154	6359
0,4	5466	5653
0,5	4574	4741

Tabela 5.5 – Número de elementos e nós nos modelos.

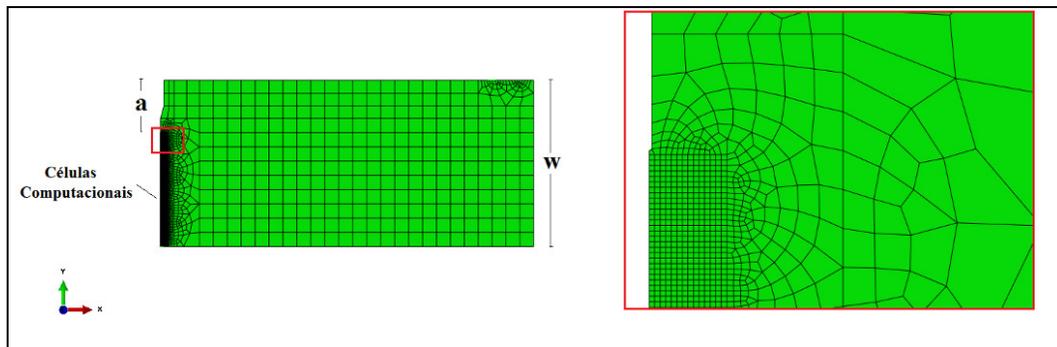


Figura 5.49 – Malha de E.F. e células computacionais no CP.

Os roletes que simulam o equipamento em flexão foram modelados como superfícies rígidas cilíndricas de raio 10 mm. Para simular a interação entre os roletes e o CP foi adotado uma formulação contato superfície – superfície sem atrito. O carregamento foi aplicado por controle de deslocamento vertical de 8 mm no rolete lateral, simulando a aplicação em flexão no teste. Ao rolete central foi imposta uma restrição de deslocamento como mostrado na Figura 5.50. Em face de limitações existentes no ABAQUS 6.12 quanto ao uso de rotinas de extinção de elementos associados ao modelo de Gurson, foi adotado o procedimento de análise Dinâmica Explícita. Com o intuito de minimizar os efeitos de inércia o deslocamento foi aplicado ao longo de 1 s seguindo a seguinte função :

$$u(t) = t^3 \cdot (10 - 15t + 6t^2) \cdot 8mm \quad (5.5)$$

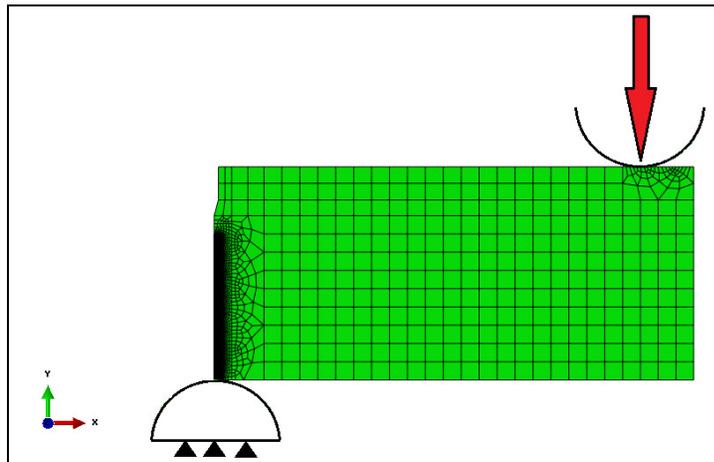


Figura 5.50 – Condições de contorno do modelo.

Os parâmetros utilizados nos elementos das células computacionais são mencionados a seguir :

- Dada a simetria, o tamanho de célula (D) foi estabelecido como um valor aproximadamente igual à metade do CTOD de iniciação dos testes desenvolvidos ($\delta=0,14mm$), $D=0,07mm$.
- O valor de f_c foi estabelecido como igual à porosidade inicial f_0 . Apesar de não usual (não foram encontrados precedentes na literatura), esta consideração foi adotada como forma de reduzir o número de parâmetros ajustáveis envolvidos.

Diversos autores mostram que não existe um único conjunto de parâmetros (f_0, f_c, D) capazes de ajustar um mesmo conjunto de dados experimentais, de tal forma que o valor de f_0 encontrado deverá ser associado a um valor de D e f_c . Ademais, nas versões mais recentes do modelo de Gurson, f_c deixa de ser uma constante ajustável e passa a ser uma variável de estado. Conforme será visto, a hipótese adotada não comprometeu os resultados.

- O valor de $f_F = 0,2$, tido como valor típico [57] .
- $q_1 = 1,5$ e $q_2 = 1$, ambos tidos como valores típicos.

A Figura 5.51 mostra a tensão equivalente (von Mises) em dois instantes diferentes da simulação (frame 2000 e frame 4800) para $a/W=0,3$.

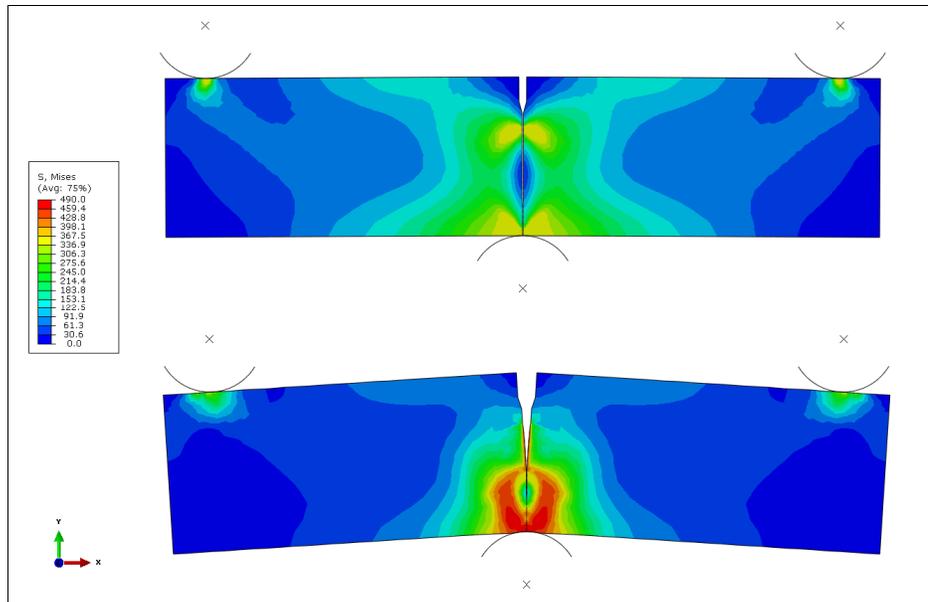


Figura 5.51 – Tensão de von Mises (frame 200 e 4800) - $a/W=0,3$.

O processo de calibração do parâmetro f_0 (o único não pré-fixado) foi feito a partir dos resultados das curvas Carga vs. COD dos modelos mantendo constantes todos os demais parâmetros, variando o f_0 e comparando com as curvas experimentais. As curvas numéricas que melhor se ajustaram às experimentais, considerando os diferentes tipos de teste, foram finalmente as que definiram o valor mais adequado de f_0 . A Figura 5.52 mostra as curvas P vs. COD - $a/W = 0,5$ experimentais e numéricas para diferentes valores de f_0 . Nota-se uma boa concordância nas curvas numéricas e experimentais especialmente para valores de $f_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ e 10^{-5} .

A Figura 5.53, mostra as curvas experimental e numérica para $a/W=0,4$. Aqui pode ser visto uma boa concordância no início das curvas mas uma pequena diferença ao aumentar o deslocamento. Os valores de f_0 com melhor ajuste neste caso são $f_0=3 \cdot 10^{-5}$ e 10^{-5} .

A Figura 5.54 mostra as curvas para $a/W = 0,3$. Analogamente às curvas anteriores, nota-se uma boa concordância no início das curvas, tendo uma diferença na inclinação ao aumentar o deslocamento. Nesses gráficos o melhor ajuste foi nos valores de $f_0 = 5 \cdot 10^{-5}$, $3 \cdot 10^{-5}$ e 10^{-5} . Considerando as comparações nos diferentes tamanhos de trinca foi considerado o valor de $f_0 = 3 \cdot 10^{-5}$ como calibrado para porosidade inicial.

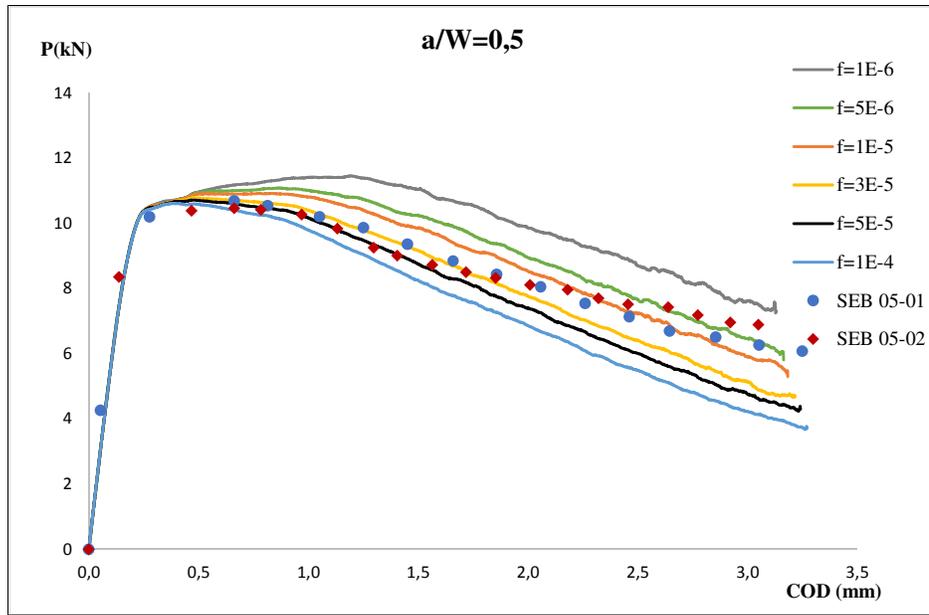


Figura 5.52 – Curvas P vs COD $a/W=0,5$ experimental e numérico.

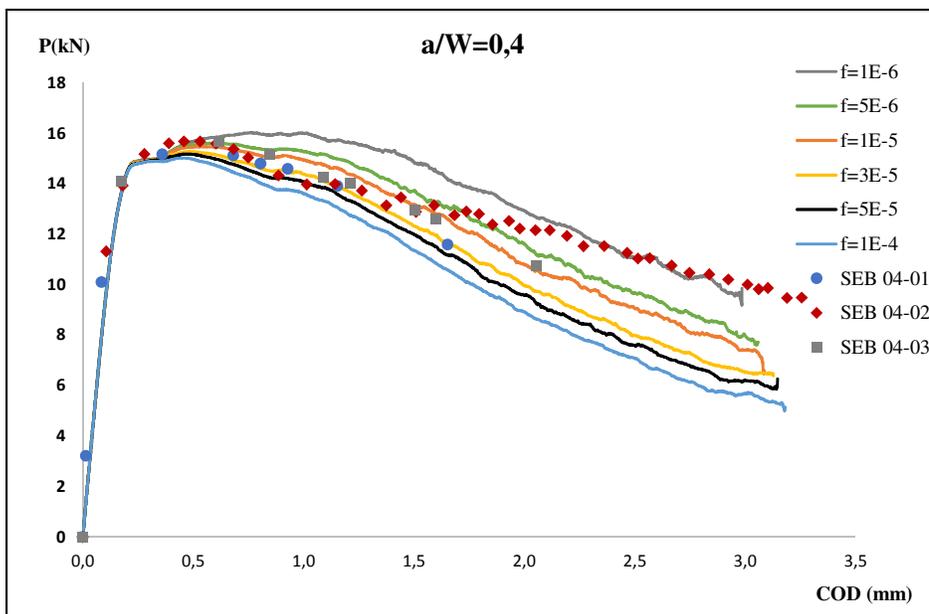


Figura 5.53 – Curvas P vs COD $a/W=0,4$ experimental e numérico.

A Figura 5.55 mostra as curvas P vs. COD experimentais para os diferentes valores de trinca inicial e seus respectivos resultados numéricos considerando o valor calibrado de f_0 . Desta forma foi possível reproduzir os ensaios feitos no laboratório por meio de procedimentos numéricos.

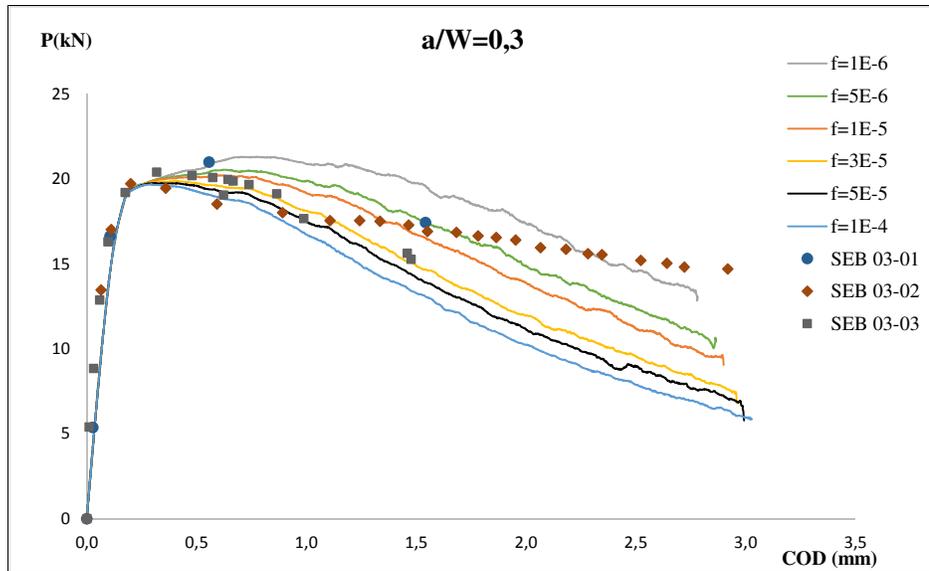


Figura 5.54 – Curvas P vs COD $a/W=0,3$ experimental e numérico.

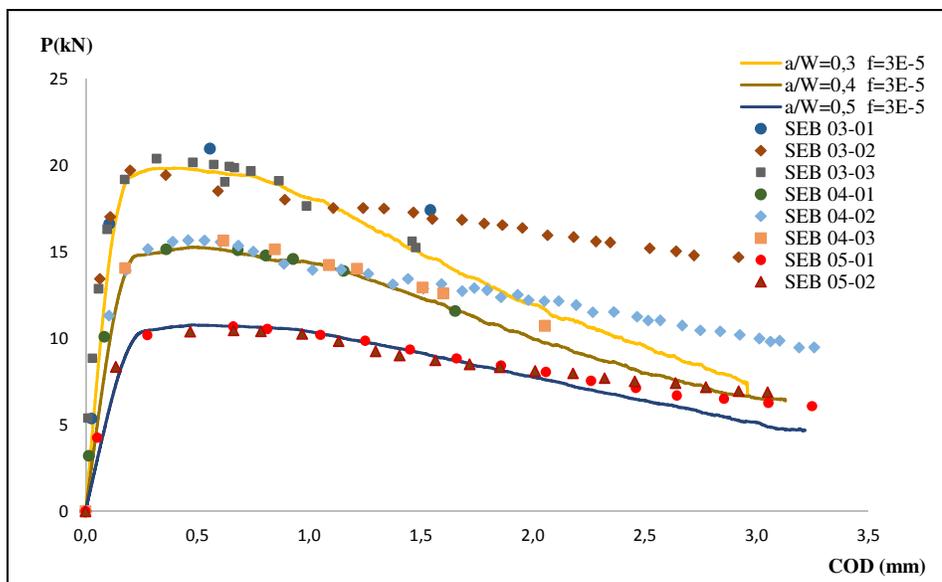


Figura 5.55 – Curvas P vs COD ajustadas.

A simulação numérica dos testes de Tenacidade foi desenvolvida com sucesso graças ao interesse e grande apoio do colega Ms. Rafael Goes (PUC-Petrobras).