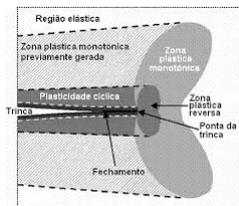


10. PLASTIFICAÇÃO NA FRENTE DA TRINCA

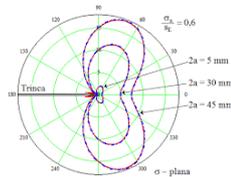
Prof. Dr. Julio Almeida

Universidade Federal do Paraná

Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica



PGMEC



1

ABORDAGEM DA MECÂNICA DA FRATURA

A abordagem da Mecânica da Fratura quanto à plastificação na ponta da trinca divide-se em duas categorias principais: a) correções simplificadas da MFEL; b) parâmetros de fratura que permitem contemplar o comportamento não-linear do material.

2

PLASTICIDADE NA PONTA DA TRINCA

- na prática, tanto aços quanto materiais cerâmicos ou vítreos são capazes de desenvolver um certo grau de plasticidade na frente da trinca;
- em materiais elastoplásticos, ocorre um escoamento na região próxima à ponta da trinca, caracterizando uma redistribuição localizada das tensões;

3

PLASTICIDADE NA PONTA DA TRINCA

- a região plastificada contribui para aumentar a tenacidade do material (maior consumo de energia para a ruptura), comprometendo porém, a análise elástica do problema da fratura;
- desta forma, a análise elástica de tensões é cada vez menos exata à medida que se aumenta a zona plástica em frente da trinca;

4

PLASTICIDADE NA PONTA DA TRINCA

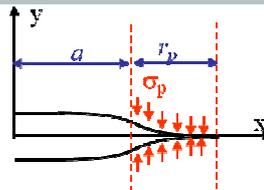
- nessas circunstâncias e numa primeira aproximação, considera-se uma distância medida a partir da frente da trinca (designada como raio de plastificação) na qual o conceito da plastificação localizada é válida;
- para demais casos, deve-se considerar os conceitos da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

5

TAMANHO DA REGIÃO PLASTIFICADA

O tamanho da região plastificada pode ser estimada por 2 critérios distintos: o critério de Irwin e o critério de Dugdale.

Ambos os critérios levam, assim, a uma correção da região plastificada.



6

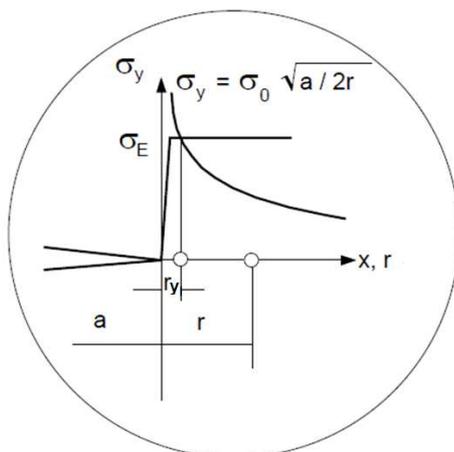
REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN

- *Irwin* (1960) estabeleceu que a zona de plastificação na frente da trinca se comporta como se existisse uma trinca de tamanho ligeiramente maior que a trinca original;

- nessas circunstâncias, estima-se um tamanho efetivo de trinca, o qual é um pouco maior do que o tamanho físico original.

7

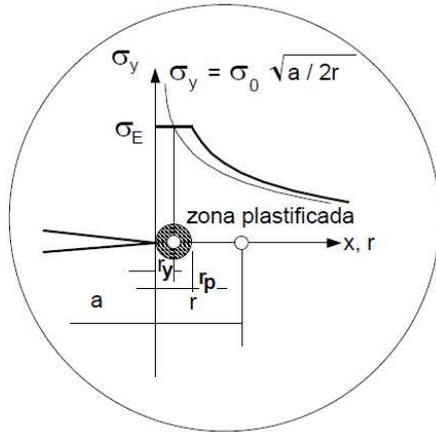
REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN



$r_y = ? \dots$

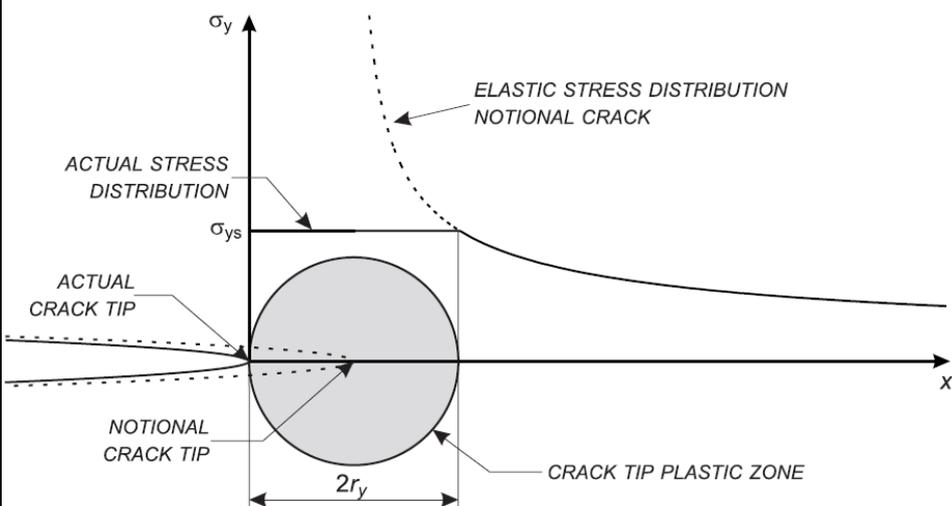
8

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN

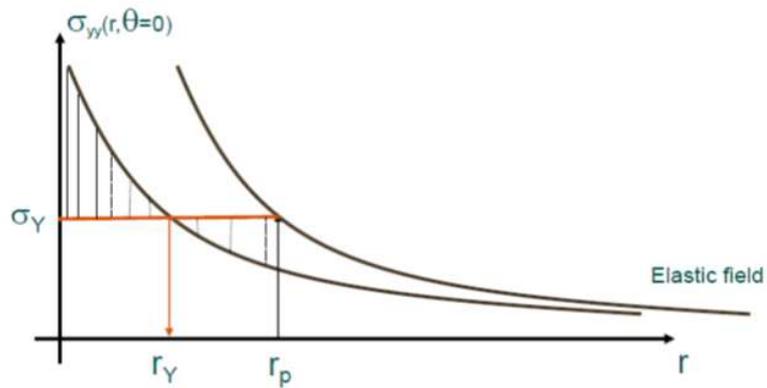


$r_p = ?$ – ao escoar, as tensões devem se redistribuir a fim de satisfazer as condições de equilíbrio.

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN



REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN



11

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN

Conclusões:

- a redistribuição de tensões na região próxima ao extremo da trinca (escoamento do material) faz com ocorra um deslocamento para a direita da curva de (σ_y) ;
- ocorre uma redistribuição assintótica de tensões a um eixo translado de r_y ;
- tal condição é designada como trinca efetiva.

12

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN

$$a_{efet} = a + r_y$$

com:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \Rightarrow EPT$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \Rightarrow EPD$$

13

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE IRWIN

$$a_{efet} = a + r_y$$



$$K_{efet} = f \left(\frac{a}{W} \right)_{efet} \sigma \sqrt{\pi a_{efet}}$$

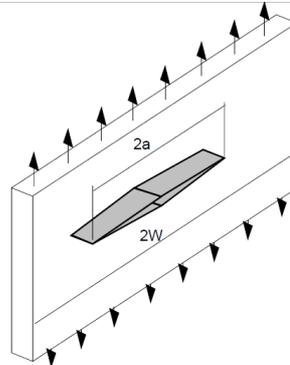
trata-se de um processo iterativo em função do fator de forma.

14

EXEMPLO 01

Determinar o raio de plastificação e o fator de intensidade de tensões para a placa ilustrada supondo uma tensão de escoamento de 300 MPa.

Dados: $B = 2 \text{ mm}$, $2a = 200 \text{ mm}$, $2W = 400 \text{ mm}$ e $\sigma_0 = 100 \text{ MPa}$.



15

EPT ou EPD ?

A espessura da peça pode ser adotada para definir, de modo aproximado, o estado de tensões presente.

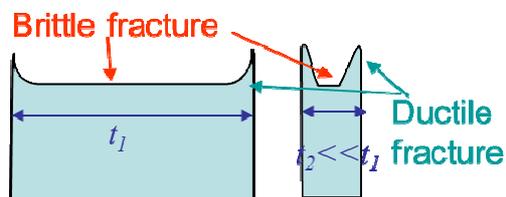
Se a peça for de grande espessura, ou seja, tiver uma espessura maior que um valor mínimo (B_{\min}), então o material à frente da trinca estará em EPD.

16

EPT ou EPD ?

Por outro lado, se a peça for suficientemente fina, ou seja, tiver uma espessura menor que um valor máximo (B_{\max}), então o material à frente da trinca estará em EPT.

Situações intermediárias indicam um estado misto.



17

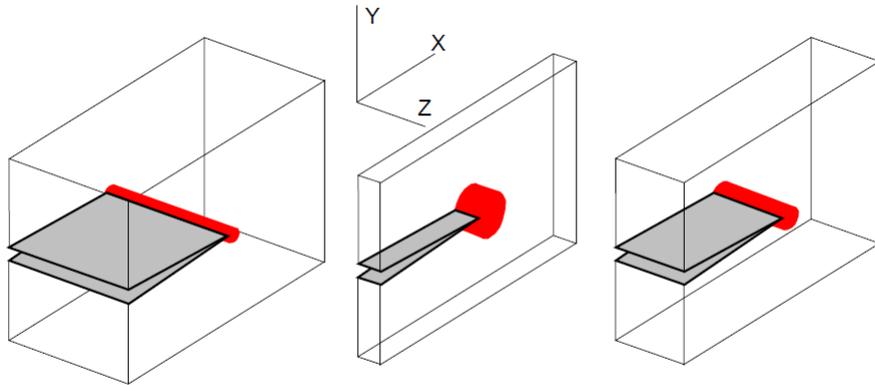
EPT ou EPD ?

$$B_{\min} = 2,5 \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \Rightarrow \text{mínimo para EPD}$$

$$B_{\max} = 0,3 \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \Rightarrow \text{máximo para EPT}$$

18

EPT ou EPD ?



Estado Plano de Deformações

Estado Plano de Tensões

Estado Misto de Tensões

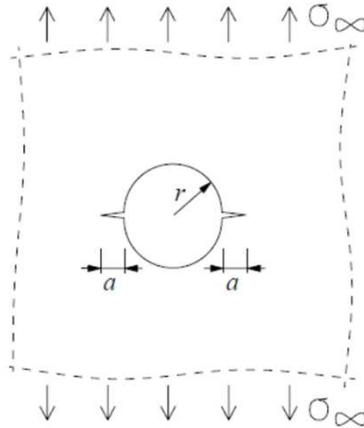
19

EXEMPLO 02

Em um furo circular ($r = 10 \text{ mm}$) em uma grande chapa, duas fendas (comprimento $a = 5 \text{ mm}$) foram descobertas. Determinar o valor máximo de tensão (tensão crítica) com a qual a placa poderá ser carregada. Dados: espessura $t = 20 \text{ mm}$, $K_{IC} = 40 \text{ MN} / \text{m}^{3/2}$ e limite de escoamento de 500 MPa .

20

EXEMPLO 02 - continuação

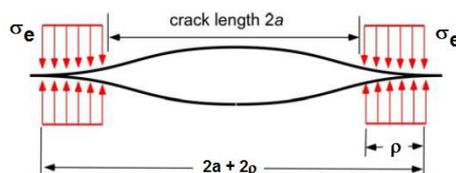


21

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE DUGDALE

- *Dugdale* (1962) estabeleceu uma correção diferenciada da correção de *Irwin*;

- a zona de plastificação é modelada assumindo uma fissura de comprimento total $(2a + 2\rho)$, onde ρ é o comprimento da zona plástica, com uma tensão de fechamento equivalente à tensão de escoamento mas aplicada nas extremidades da fissura;



22

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE DUGDALE

- o comprimento (ρ) da zona plástica deve ser definido de tal modo que os fatores de intensidade de tensão e a tensão remota devam se anular, resultando em:

$$\rho = a \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{180(\sigma)}{2\sigma_e}\right)} - 1 \right)$$

23

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE DUGDALE

quando, porém: $\sigma \cong \sigma_e$

$$\rho = \frac{\pi^2 \sigma^2 a}{8\sigma_e^2} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2$$

24

REGIÃO PLASTIFICADA – CRITÉRIO DE DUGDALE

$$a_{efet} = a + \rho$$

$$K_{efet} = \sigma_e \sqrt{\pi a_{efet}} \left[\frac{8}{\pi^2} \ln \sec \left(\frac{180(\sigma)}{2\sigma_e} \right) \right]^{0,5}$$

25

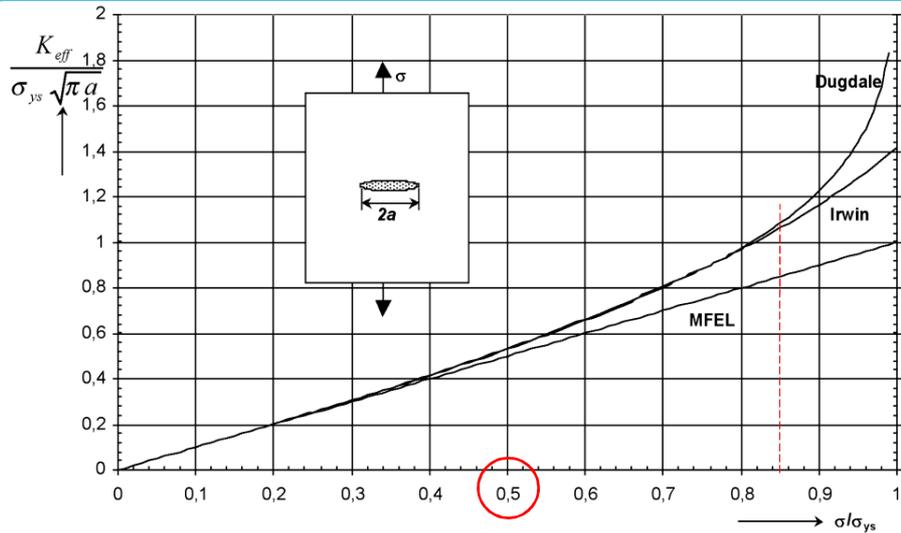
IRWIN x DUGDALE

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \cong 0,318 \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2$$

$$\rho = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_I}{\sigma_{esc}} \right)^2 \cong 0,393 \left(\frac{K_I}{\sigma_{esc}} \right)^2$$

26

IRWIN x DUGDALE

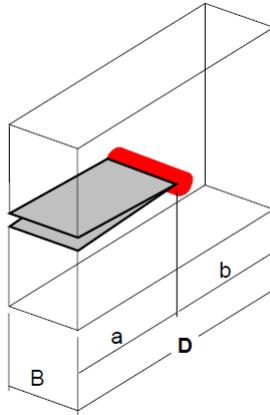


$\sigma = \sigma_{esc} \Rightarrow K_{Iefet} \rightarrow \infty$: plastificação generalizada por Dugdale

TAMANHO DA ZONA PLASTIFICADA

os conceitos da MFEL em condições de plastificação, somente poderão ser considerados caso o raio de plastificação seja pequeno em relação ao tamanho da trinca ou ao ligamento que corresponde a parte não rompida ($b = D - a$):

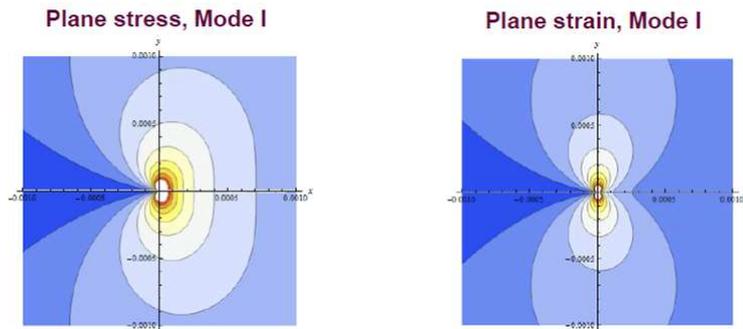
TAMANHO DA ZONA PLASTIFICADA



tal restrição se impõem pela necessidade de haver um volume suficiente de material elástico à frente da trinca de modo a validar o referido cálculo.

29

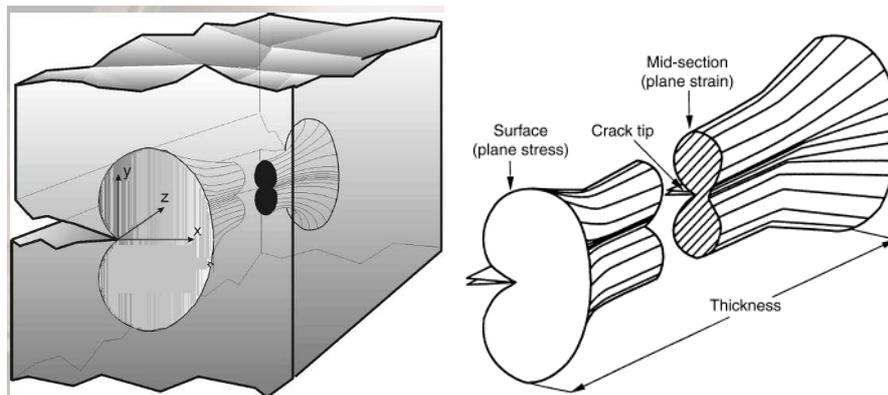
ESTIMATIVA BIDIMENSIONAL DA ZONA PLÁSTICA



$$r_p(\theta) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \left[4(1 - \nu + \nu^2) - 3 \cos^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

30

ESTIMATIVA BIDIMENSIONAL DA ZONA PLÁSTICA



31

ESTIMATIVA BIDIMENSIONAL DA ZONA PLÁSTICA

- mesmo havendo uma condição de deformação plana no interior de uma peça, sempre haverá tensão plana na superfície;
- o estado de tensões se altera ao longo da espessura da peça, motivo pelo qual a forma da zona plástica também se altera ao longo desta dimensão. Conseqüentemente, a zona plástica diminui gradualmente desde a superfície (EPT) até o interior da peça (EPD).

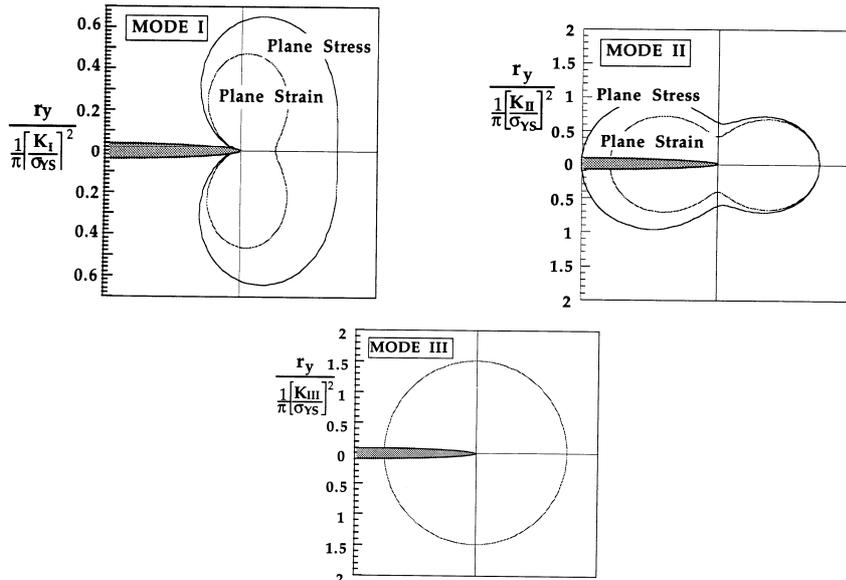
32

FORMAS DA REGIÃO PLASTIFICADA

$$r_y(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \left[1 + \cos \theta + \frac{3}{2} \text{sen}^2 \theta \right] - EPT$$

$$r_y(\theta) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \left[(1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \theta) + \frac{3}{2} \text{sen}^2 \theta \right] - EPD$$

FORMAS DA REGIÃO PLASTIFICADA

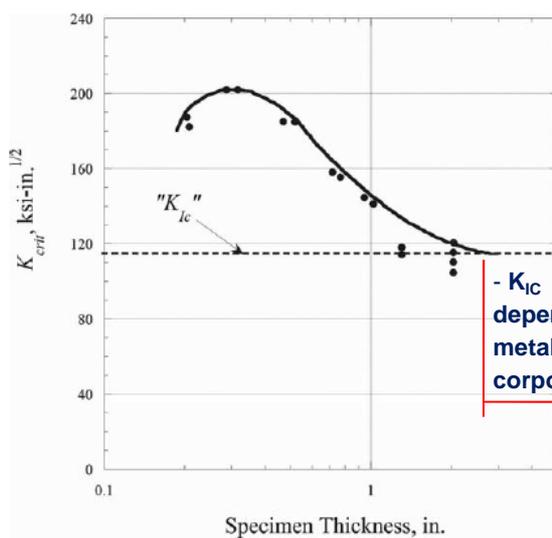


EFEITO DA ESPESSURA DA PEÇA

- a tenacidade à fratura de um material (K_{IC}) aumenta quando existe grande volume de material capaz de deformar-se plasticamente antes da fratura;
- como esse volume depende do estado de tensões existente e este, por sua vez, da espessura da peça, resulta que a tenacidade à fratura varia em função da espessura da chapa.

35

EFEITO DA ESPESSURA DA PEÇA



- K_{IC} é uma constante do material, dependendo apenas de fatores metalúrgicos e não da geometria do corpo de prova.

36

EFEITO DA ESPESSURA DA PEÇA

- chapas finas → EPT → elevada zona plástica → elevado K_{IC}
- chapas espessas → EPD → pequena zona plástica → baixo K_{IC}

37

EXEMPLO 03

Uma placa de aço de grandes dimensões de um material elástico, idealmente plástico ($\sigma_e = 500$ MPa) contém uma fissura de comprimento total $(2a) = 50$ mm. Num teste de tensão verificou-se que a fissura começa a crescer com 300 MPa. Use o critério de *Dugdale*.

38

EXEMPLO 03 - continuação

a) em que valor de tensão a fissura inicial seria de 150 mm?

b) para os dois casos ($2a = 50$ mm e $2a = 150$ mm), calcular o comprimento “ ρ ” da zona plástica na ponta da fissura, quando a tensão é tal que a fissura comece a se propagar.

Considere que a abertura da trinca é dada pela relação:

$$\delta(a) = \frac{8a\sigma_{esc}}{\pi E} \ln \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\sigma_o}{2\sigma_{esc}}\right)} \right]$$

39

BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

Almeida, J.C. *Projeto Mecânico – Enfoque baseado na Mecânica da Fratura e Fadiga - 1ª Ed.*, Elsevier (2018).

Arana, J. L. e González, J.J., *Mecánica de Fractura*, Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.

Anderson, T.L., *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*, 3ª Ed., Taylor & Francis, USA (2005).

Rosa, E., *Análise de Resistência Mecânica*, UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Análise e Projeto Mecânica, Santa Catarina (2002).

40