

***Metodologias para Avaliação de  
Integridade Estrutural em  
Componentes Críticos:  
Incorporando as Abordagens  
Mecanísticas e Fenomenológicas***

**Claudio Ruggieri**

*NAMEF*

*Núcleo Avançado em Mecânica da Fratura e Integridade Estrutural*

*Escola Politécnica*

*Universidade de São Paulo*

# Escopo

- *O Problema de Falhas Estruturais em Componentes Críticos Revisitado*
- *Metodologias Correntes Baseadas em Mecânica do Contínuo para Avaliação de Defeitos em Componentes Estruturais*
- *Limitações, Aplicabilidades e Aspectos Multidisciplinares*
- *Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Micromecânicos (Local Approaches)*

# Por Que as Estruturas e Componentes Mecânicos Falham?

Ocorrência de Defeitos Durante a Vida em Serviço

Erros Humanos, Construtivos e Operacionais

Uso de Novas Concepções de Projeto ou Novos Materiais

# Por Que as Estruturas e Componentes Mecânicos Falham?

Ocorrência de Defeitos Durante a Vida em Serviço

Erros Humanos, Construtivos e Operacionais

Uso de Novas Concepções de Projeto ou Novos Materiais



# Terremoto de Hanshin (Kobe, 1995)

阪神大震災でみられた橋梁の破壊例



倒壊したビルツ形式のコンクリート橋。鉄筋の圧接部が破断している。



橋脚の崩壊により座屈した鋼製桁。

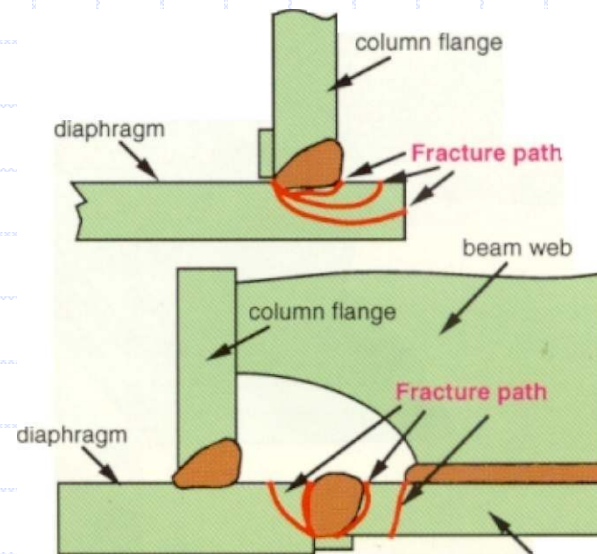




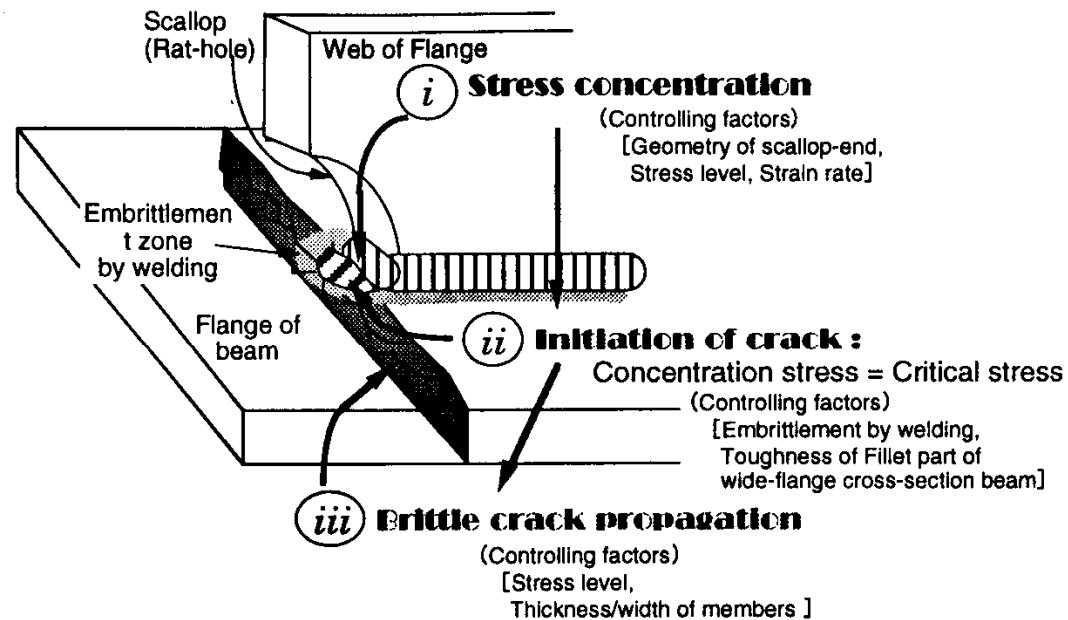
# Terremoto de Hanshin (Kobe, 1995)



梁端の梁フランジとダイアフラム溶接部のダイアフラム側に生じた亀裂がコラムへと伝播している例。



# Terremoto de Hanshin (Kobe, 1995)



*(a) Process of brittle fracture from scallop-end of beam flange*

**Detalhes Estruturais, Descontinuidades Geométricas e Processo de Soldagem Inadequados**

# Por Que as Estruturas e Componentes Mecânicos Falham?

Ocorrência de Defeitos Durante a Vida em Serviço

Erros Humanos, Construtivos e Operacionais

Uso de Novas Concepções de Projeto ou Novos Materiais

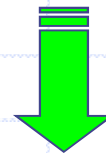
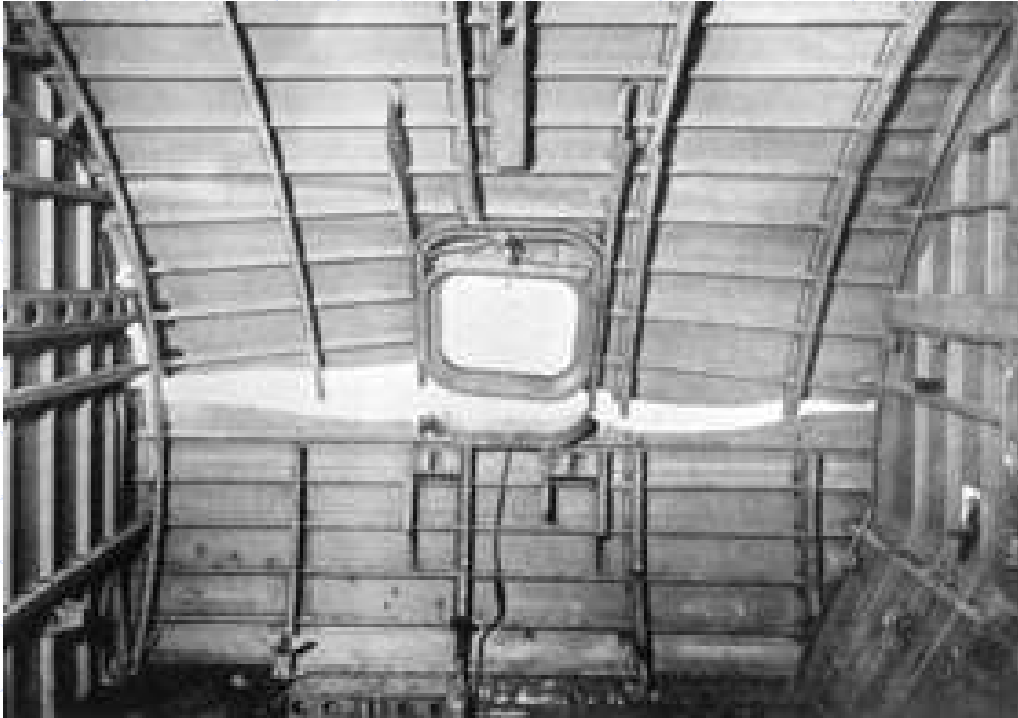
# Aviões Comet



- **Primeiro Jato Comercial Produzido (de Havilland, UK)**
- **2 Acidentes Catastróficos sobre o Mar Mediterrâneo em 1954 Causados por Fadiga Após Relativamente Poucos Ciclos de Pressurização**



# Aviões Comet



**Propagação de Trincas a Partir de Aberturas na Fuselagem  
(Intensificadas por Furos de Rebites Próximos às Janelas)**

# Por Que as Estruturas e Componentes Mecânicos Falham?

**Ocorrência de  
Defeitos Durante a  
Vida em Serviço**

**Erros Humanos,  
Construtivos e  
Operacionais**

**Uso de Novas  
Concepções de  
Projeto ou Novos  
Materiais**

# Falha Catastrófica em Equipamento



**Fratura Frágil Devido à Presença de Defeito Estrutural**



# Falha Catastrófica em Junta Soldada

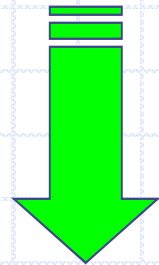


**Fratura Frágil Devido à Presença de Defeito Estrutural**

***Garantir a Integridade Estrutural e Evitar Falhas Estruturais em Serviço é Essencial na Engenharia***

# O “Misterioso” Fator de Segurança....

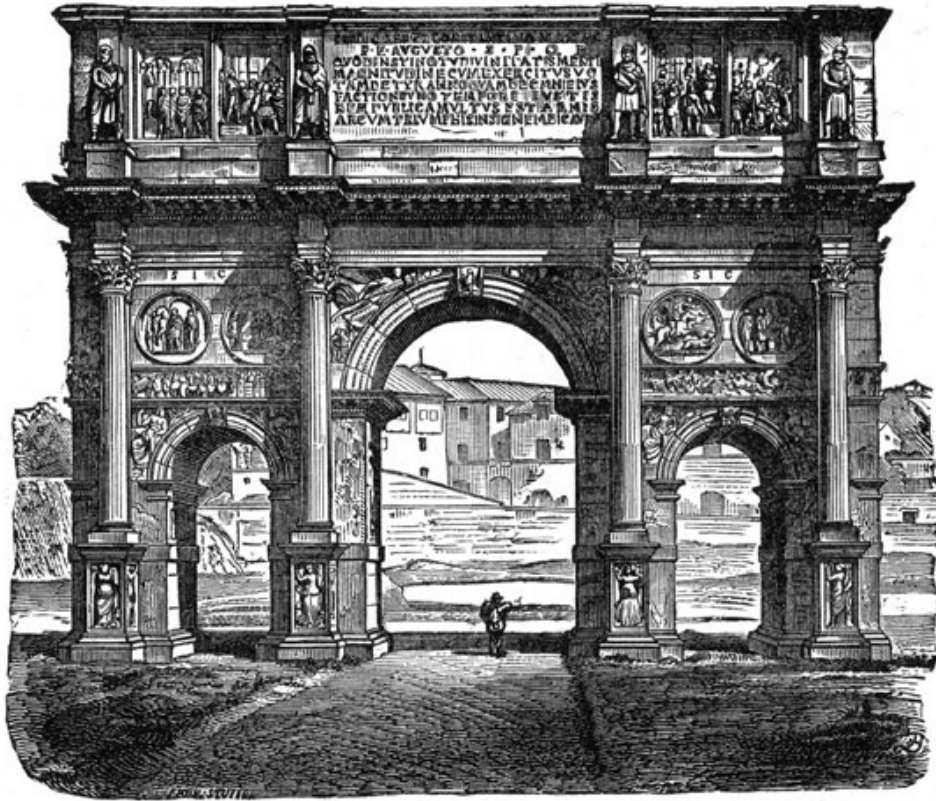
- *Fatores de Segurança Possuem Base Empírica e Foram Estabelecidos Há Décadas!*
- *Não Há Base Racional Contra Sua Diminuição*



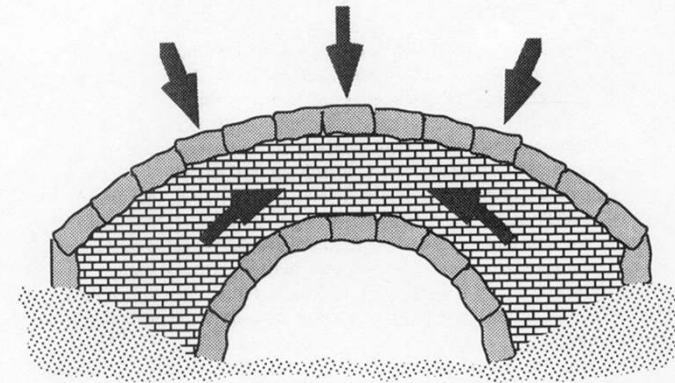
**Tensões Elevadas de Projeto Não Causam Falha.  
Danos e Defeitos Comprometem a Integridade Estrutural!**



# Era Pré-Revolução Industrial



Arco de Constantino (312 d.C.)



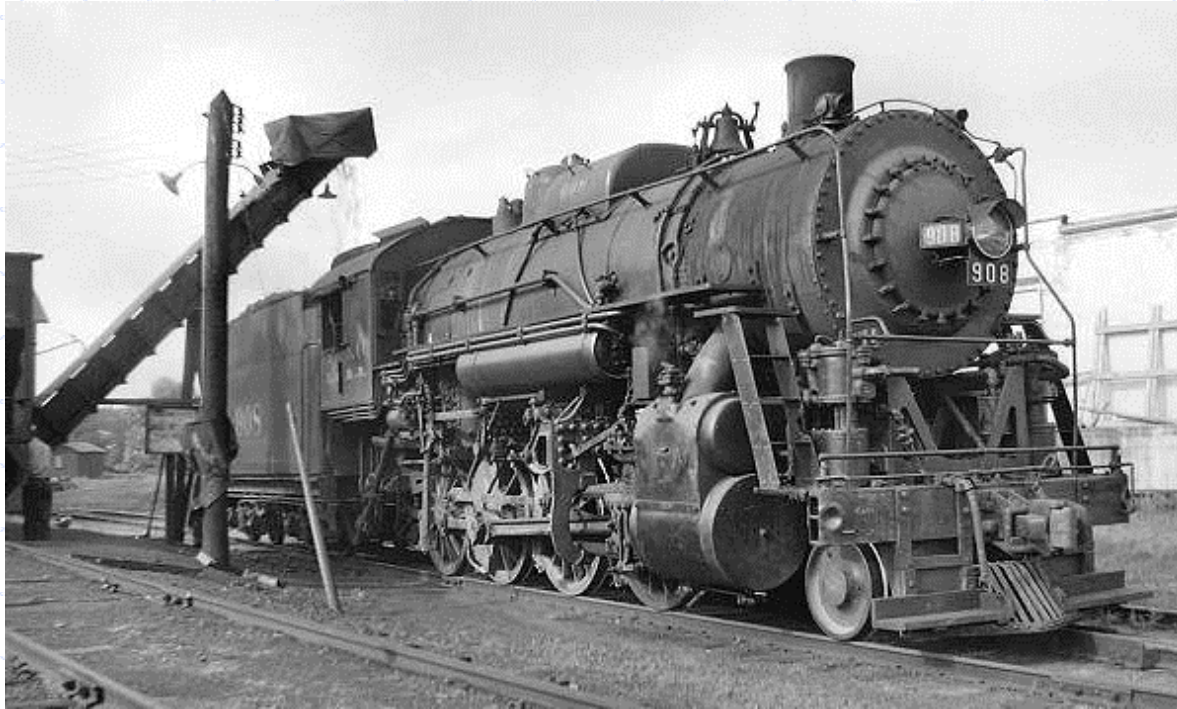
**Estruturas e Componentes Estruturais  
Submetidos Primariamente a Compressão**

# **Era Pré-Revolução Industrial:** ***Magníficas Criações da Engenharia e Arquitetura***



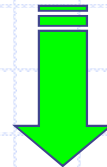
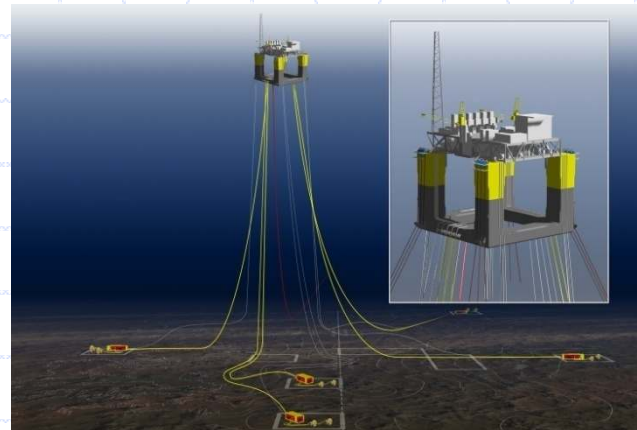


# Era Pós-Revolução Industrial



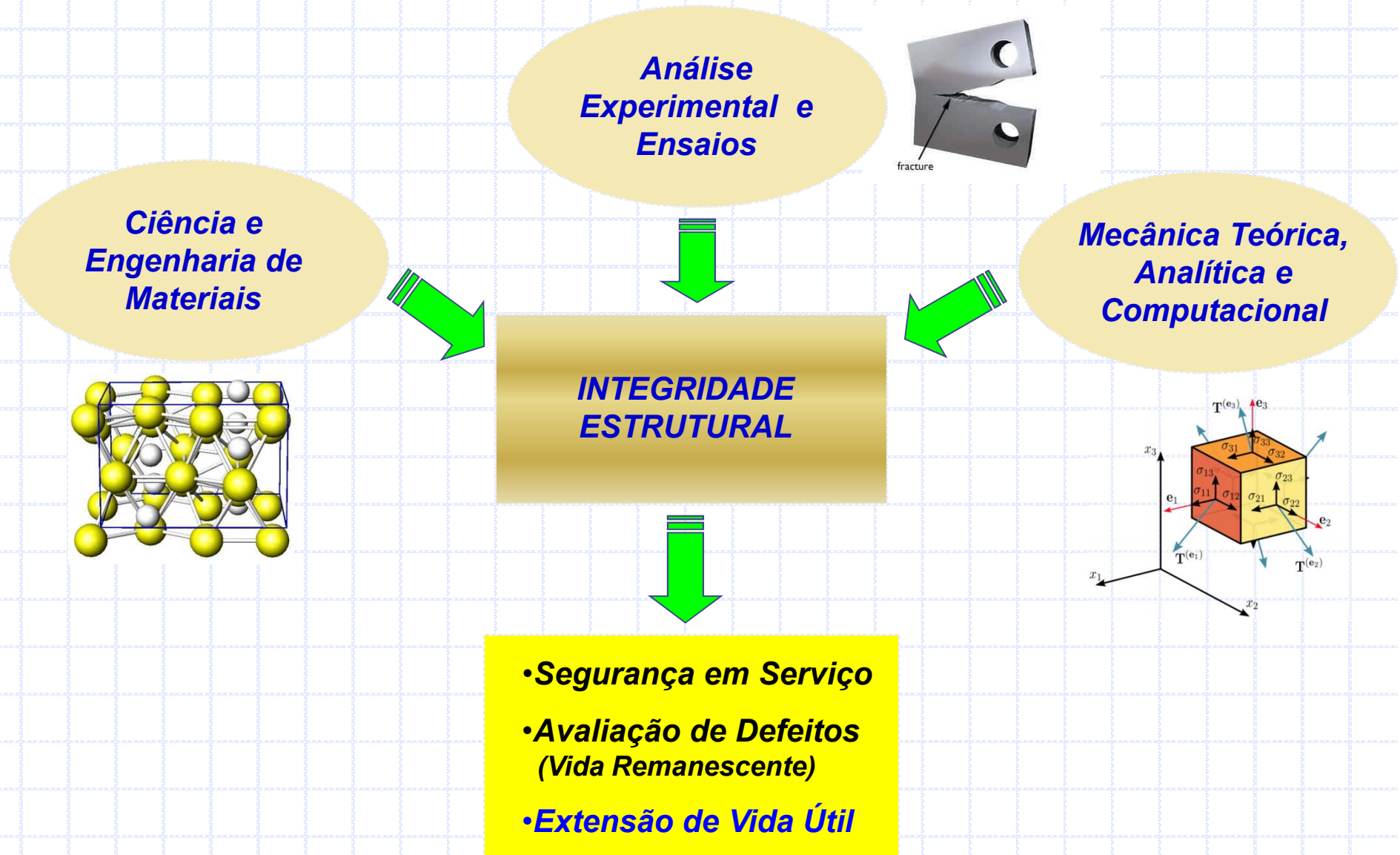
**Introdução do Aço e Ligas Metálicas Permitiu Formidável Avanço em Projeto, Construção e Operação de Máquinas, Estruturas e Componentes**

# Atingindo Limites e Novas Fronteiras



**Falhas Estruturais Tornaram-se Potencialmente Inevitáveis e Imprevisíveis!**

# Uma Ciência Emergente e Multidisciplinar

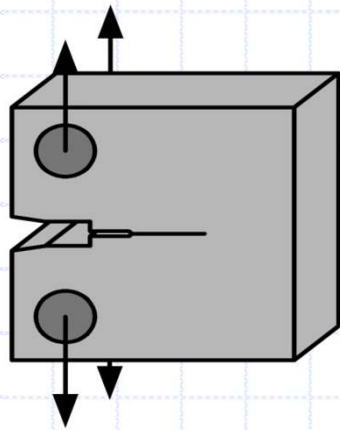




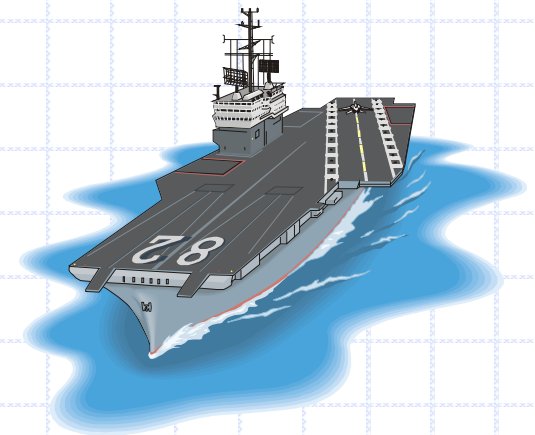
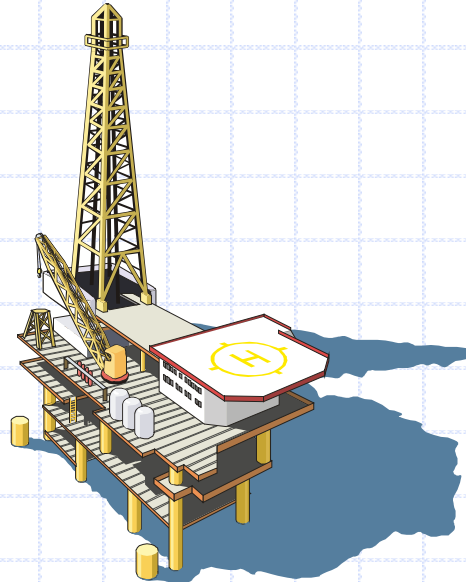
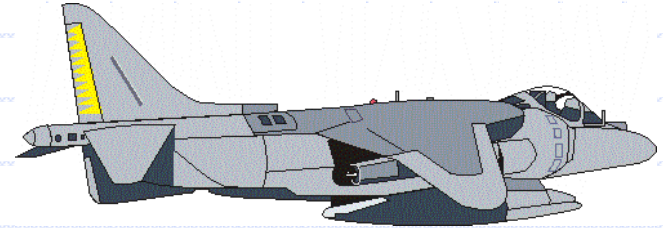
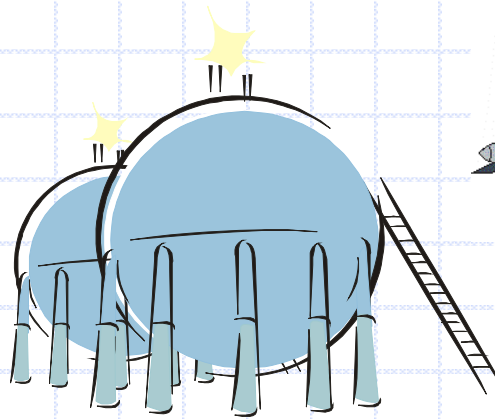
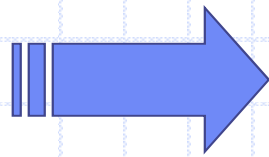
# Escopo

- *O Problema de Falhas Estruturais em Componentes Críticos Revisitado*
- ***Metodologias Correntes Baseadas em Mecânica do Contínuo para Avaliação de Defeitos em Componentes Estruturais***
- *Limitações, Aplicabilidades e Aspectos Multidisciplinares*
- *Avanços Recentes e Utilização de Modelos Micromecânicos (Local Approaches)*

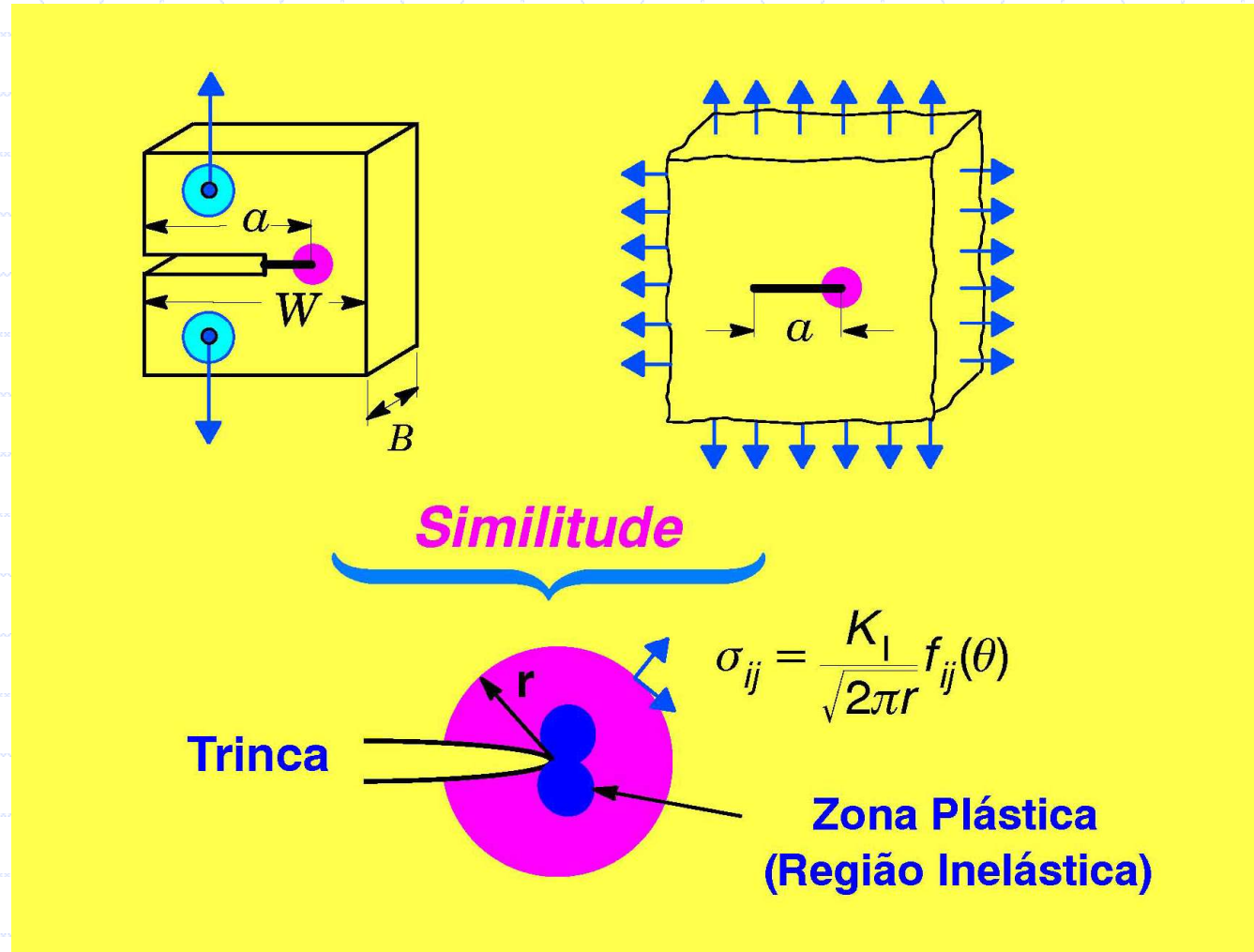
# Abordagem Monoparamétrica



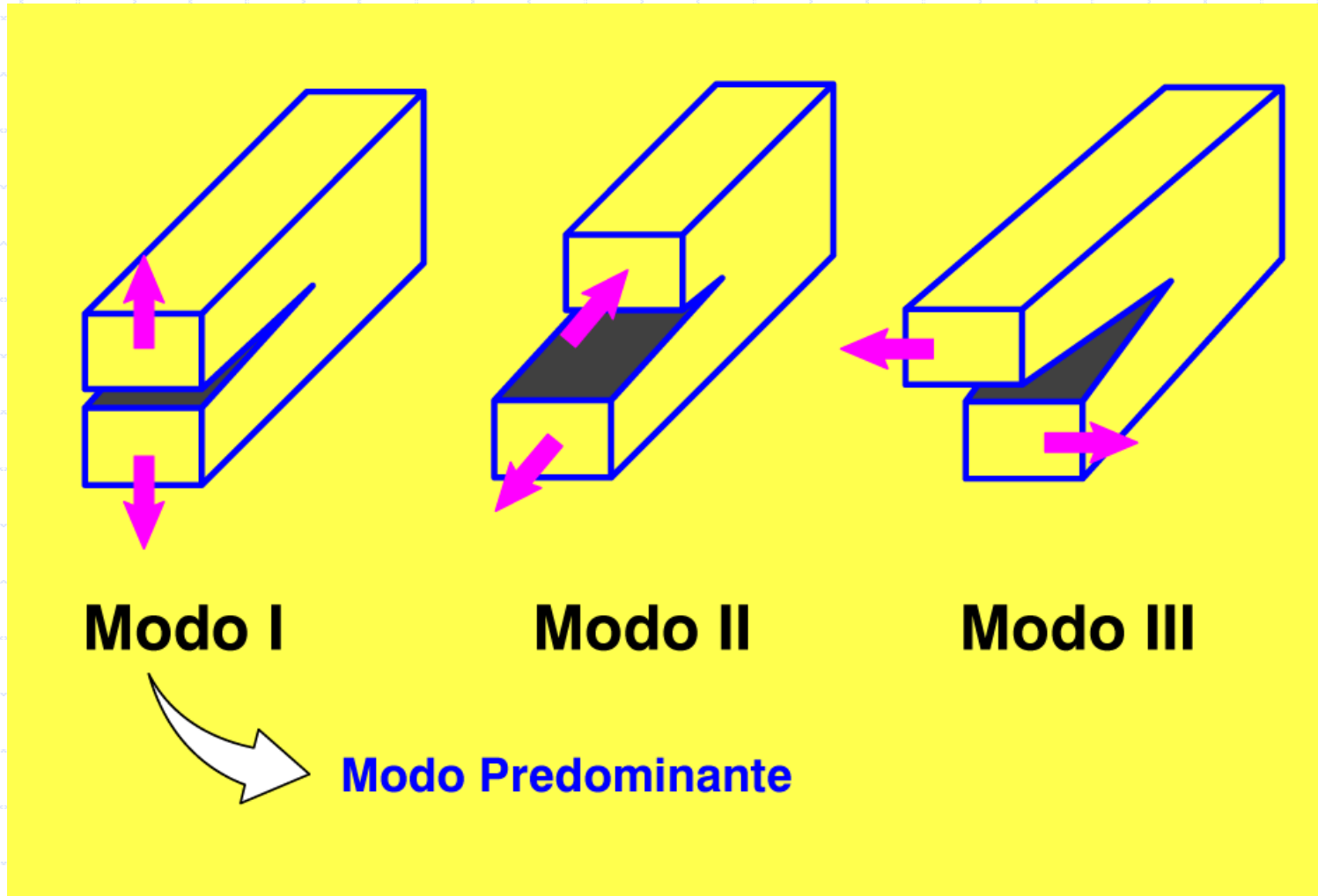
$K_1, J, CTOD$



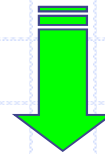
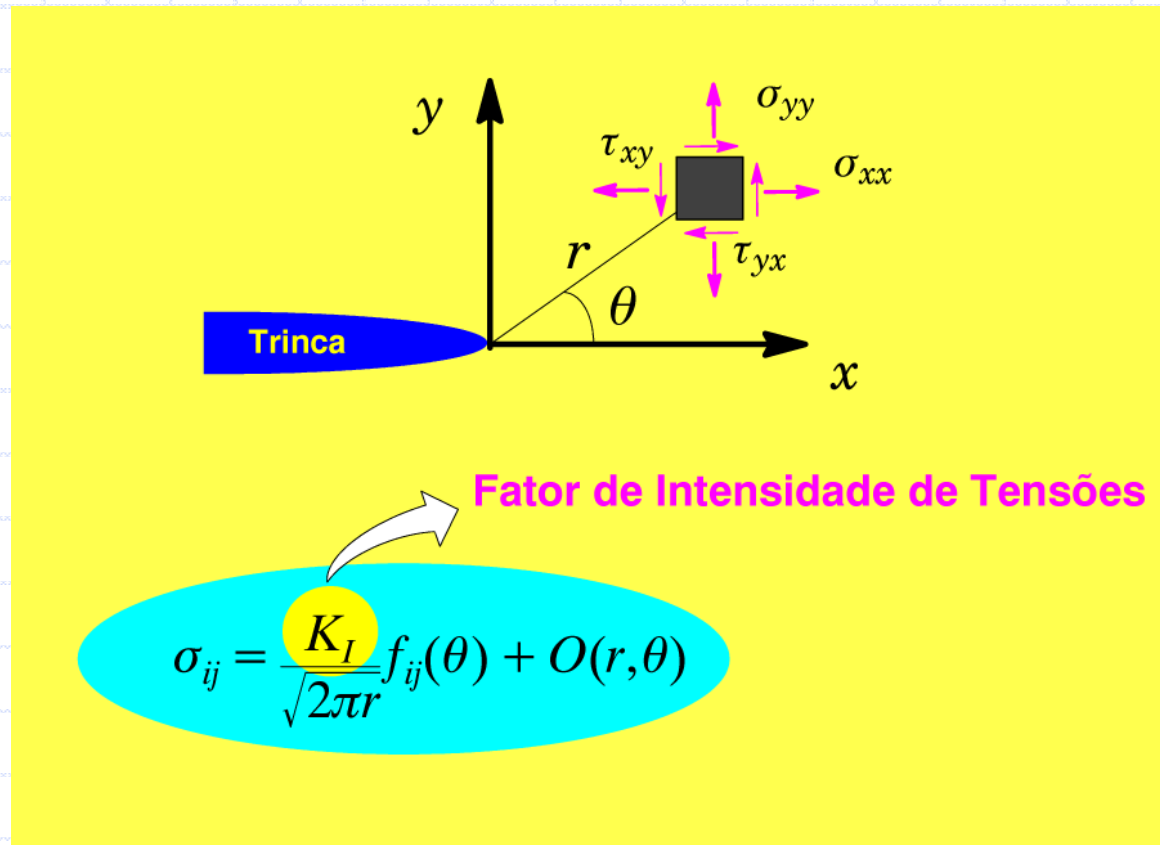
# Mecânica da Fratura Elástica Linear



# Modos de Deformação

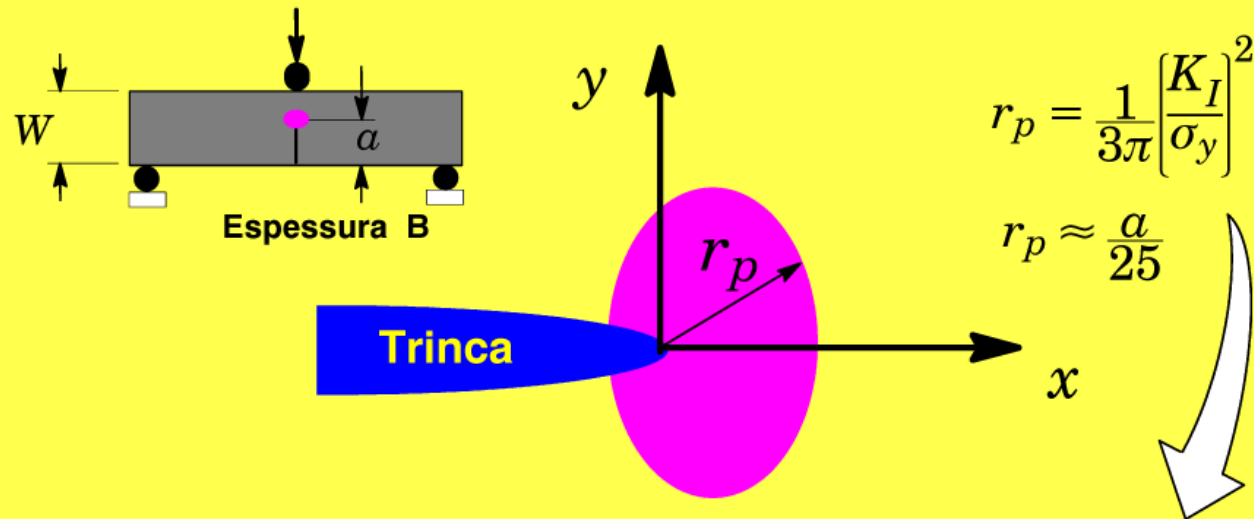


# Análise de Tensões para Trincas



**Campos Locais de Tensões Descritos por Parâmetro “Global”**

# Requisitos Dimensionais



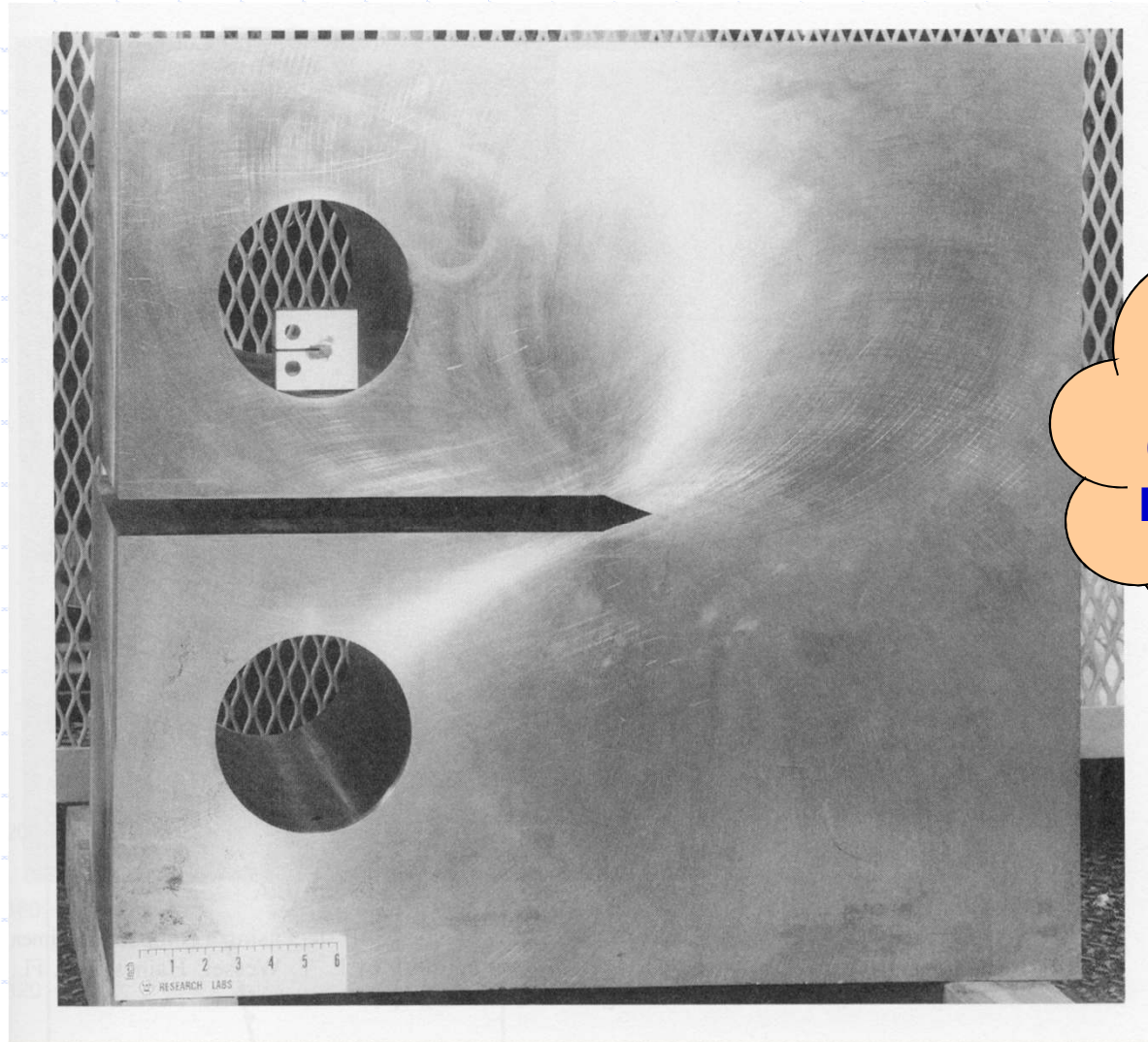
ASTM E399

$$a, B, (W - a) \geq 2.5 \left[ \frac{K_I}{\sigma_y} \right]^2$$

Estado Plano de Deformações



# Grandes Dimensões Necessárias.....



**Algo Impraticável e  
Excessivamente  
Conservador para Aços  
Estruturais Deformáveis**

# Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

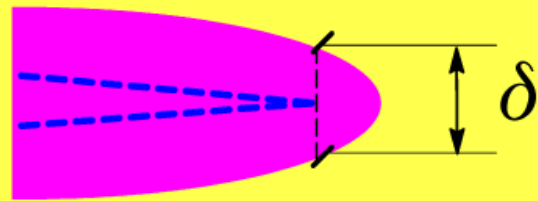
- Ocorrência de Plasticidade na Região da Trinca em Metais Invalida Mecânica da Fratura Linear Elástica.
- Necessidade de Procedimento Analítico que Relacione Tensões e Deformações em Componentes Estruturais sob Regime Elasto-Plástico (Não Linear) :  
Materiais com Alta Tenacidade  
Baixa Triaxialidade de Tensões



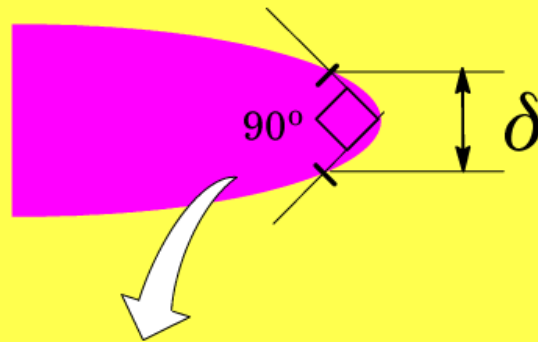
**Avaliação Quantitativa da Integridade Estrutural Através de Parâmetros Elasto-Plástico: CTOD e  $J$**



# Crack Tip Opening Displacement CTOD



Deslocamento na Ponta Original da Trinca



Deslocamento na Intersecção de Duas Retas Ortogonais Com os Flancos da Trinca

Definição Conveniente para Análises Numéricas

# Integral $J$

(Rice, 1968)

Trinca Deformada

Energia de Deformação

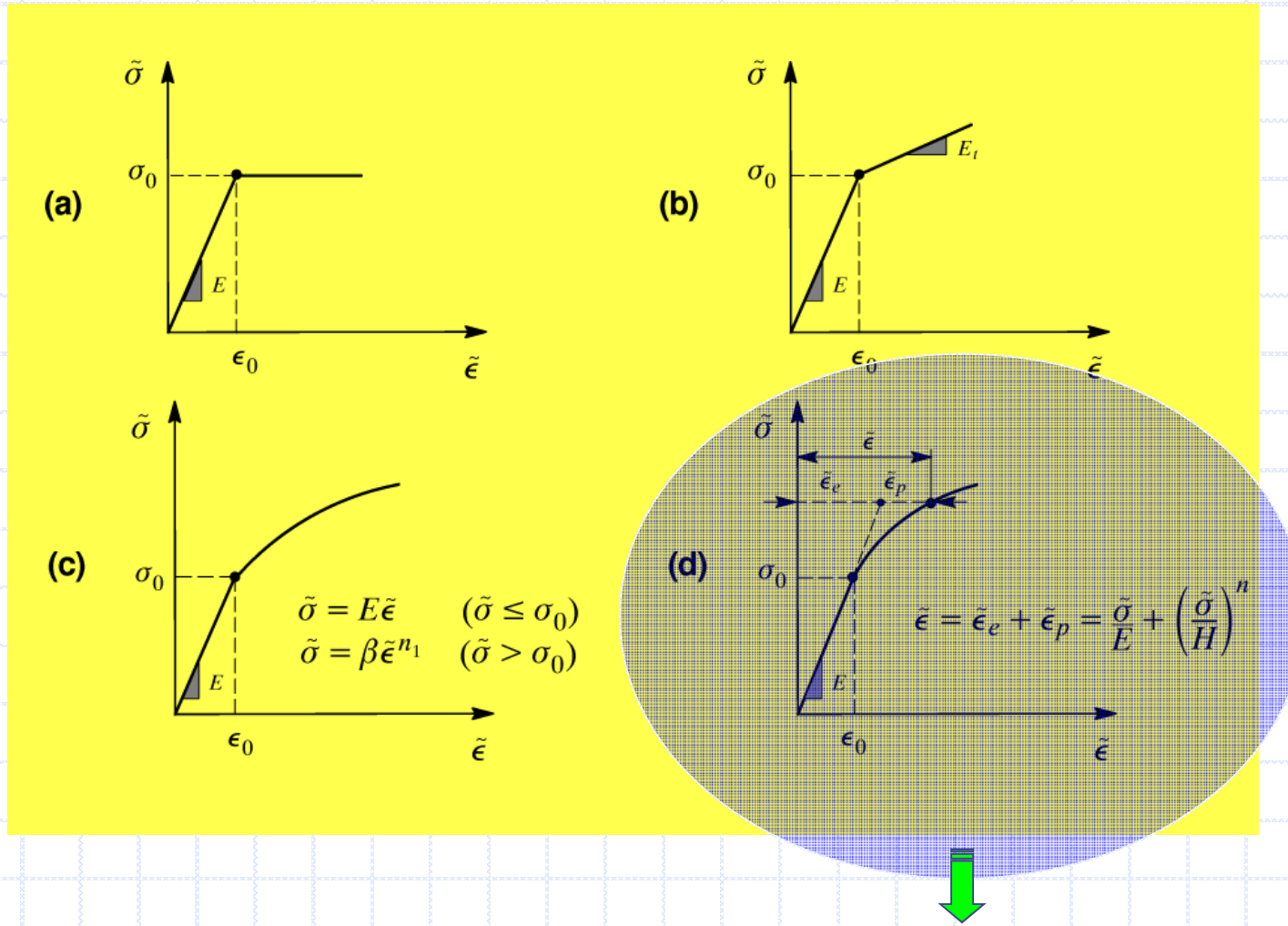
$$J = \int_{\Gamma} \left[ W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right]$$

Trações Normais

$J_{\Gamma_1} = J_{\Gamma_2}$

- Material Elástico Não Linear
- Carregamento Proporcional
- Teoria de Deformação Plástica

# Modelos Elasto-Plásticos

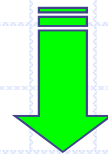
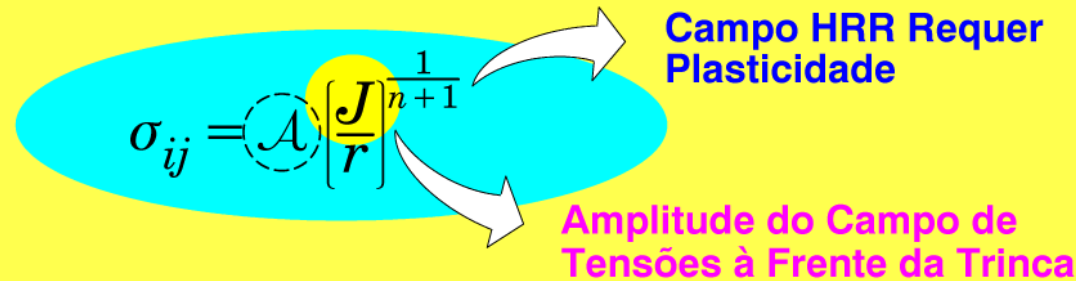
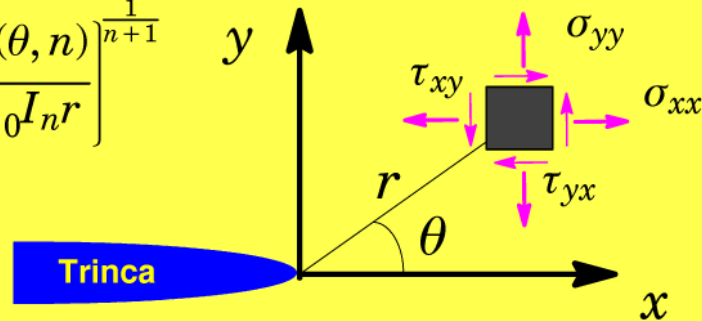


**Modelo de Ramberg-Osgood**

# Campos de Tensões Elasto-Plásticos

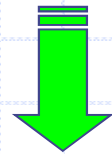
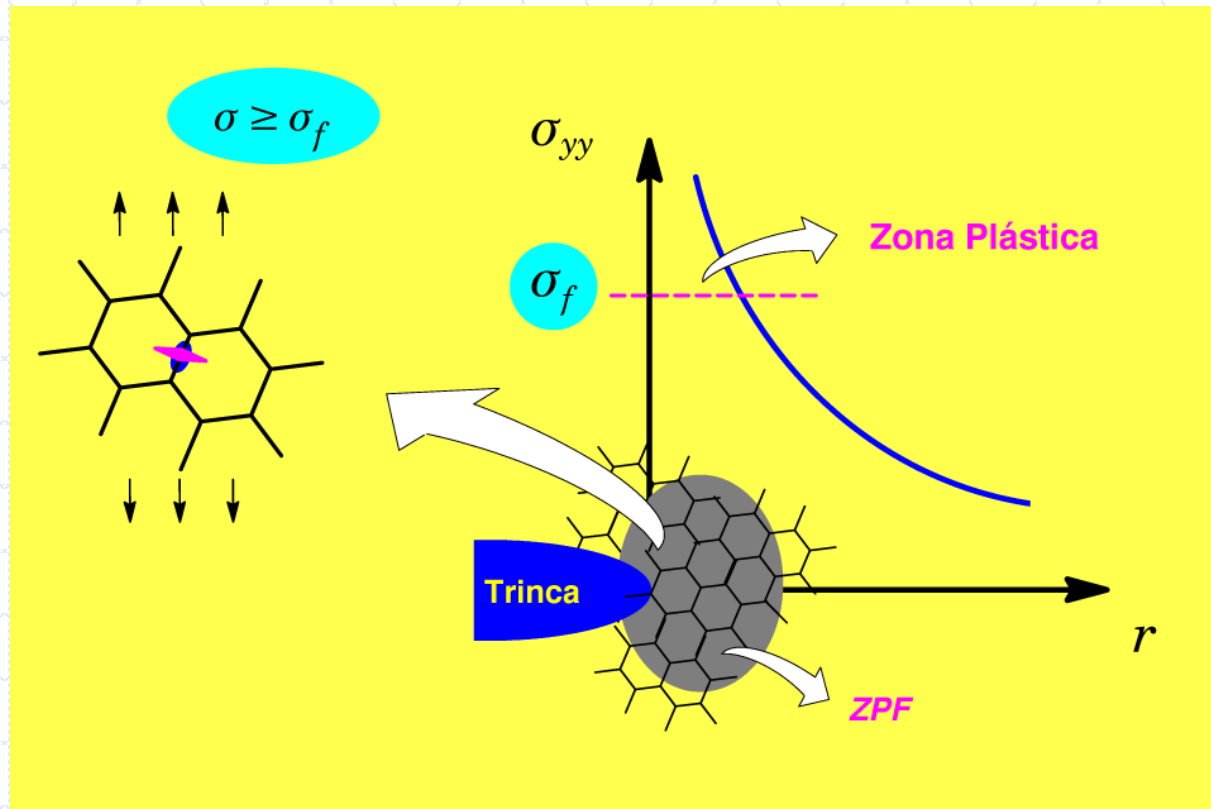
## ■ Hutchinson, Rice and Rosengren (HRR)

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 \left[ \frac{J h_{ij}(\theta, n)}{\alpha \sigma_0 \epsilon_0 I_n r} \right]^{\frac{1}{n+1}}$$



Campos Locais de Tensões Descritos por Parâmetro “Global”

# J Quantifica as Condições Locais

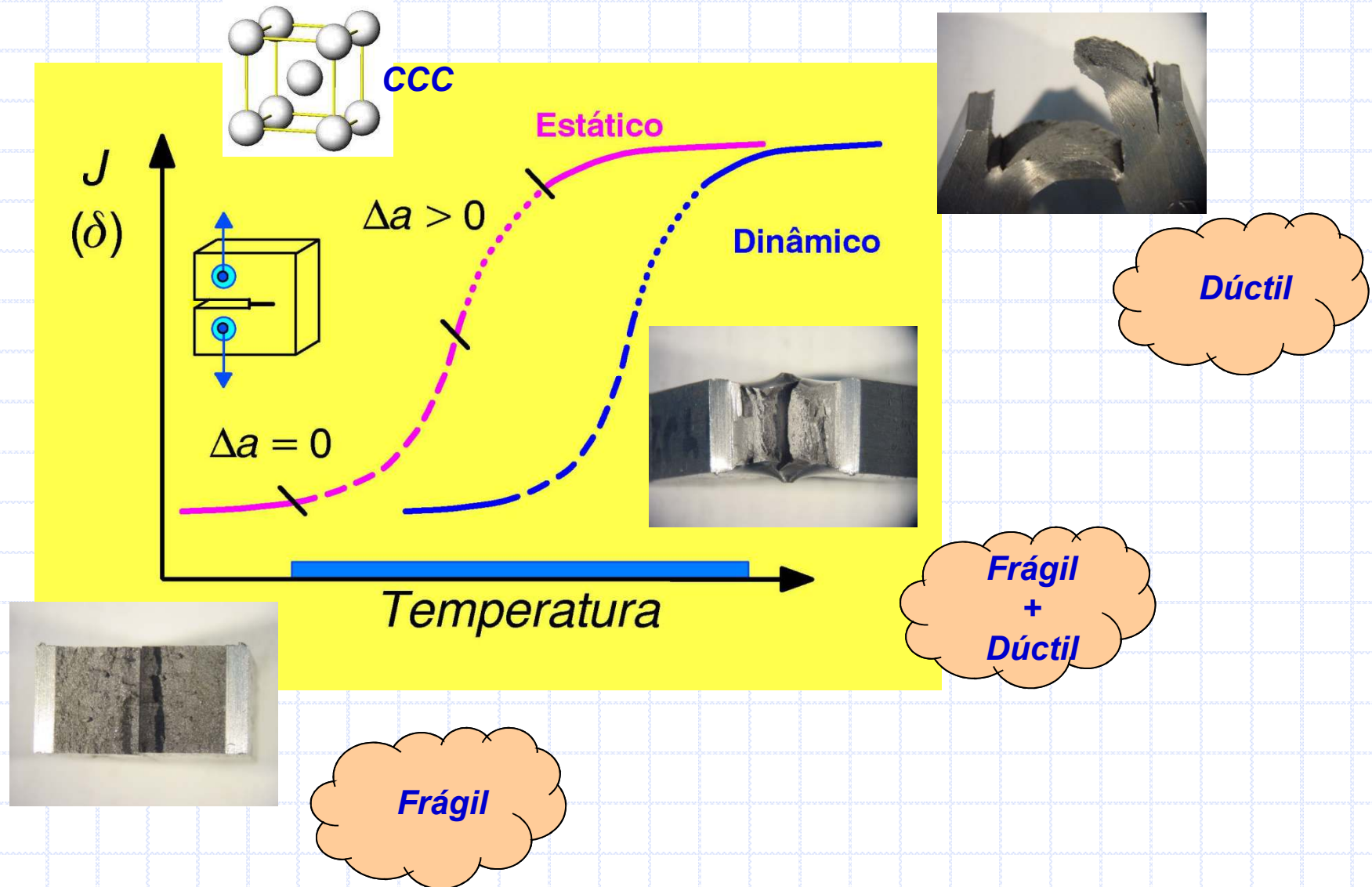


Descrição Fenomenológica a Partir do Regime “Global”

# Escopo

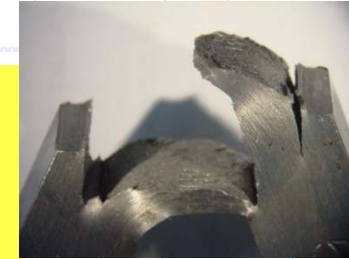
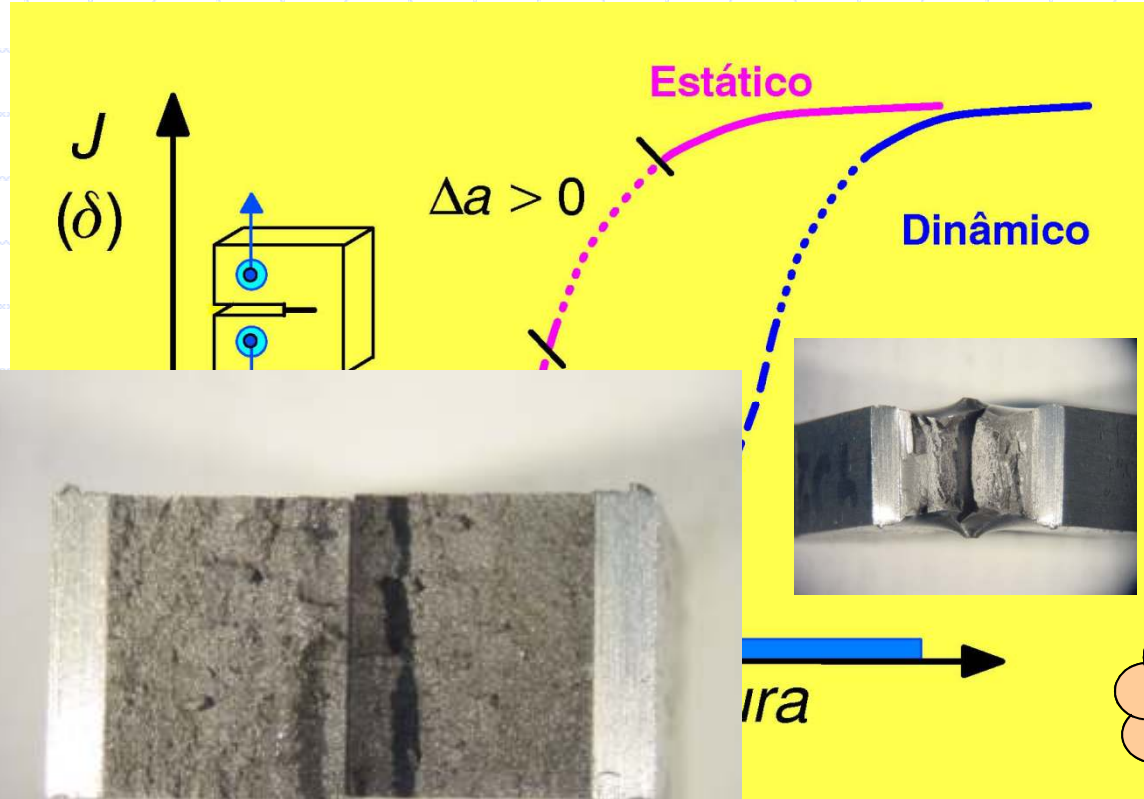
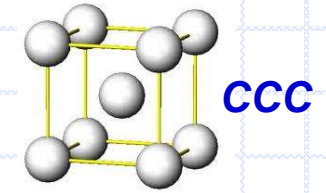
- *O Problema de Falhas Estruturais em Componentes Críticos Revisitado*
- *Metodologias Correntes Baseadas em Mecânica do Contínuo para Avaliação de Defeitos em Componentes Estruturais*
- ***Limitações, Aplicabilidades e Aspectos Multidisciplinares***
- *Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Micromecânicos (Local Approaches)*

# Transição Frágil-Dúctil





# Transição Frágil-Dúctil



Dúctil



Frágil

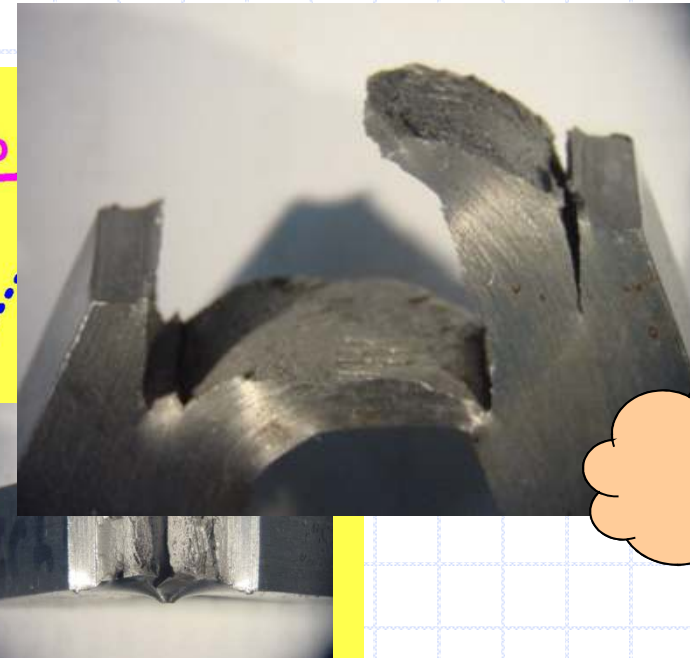
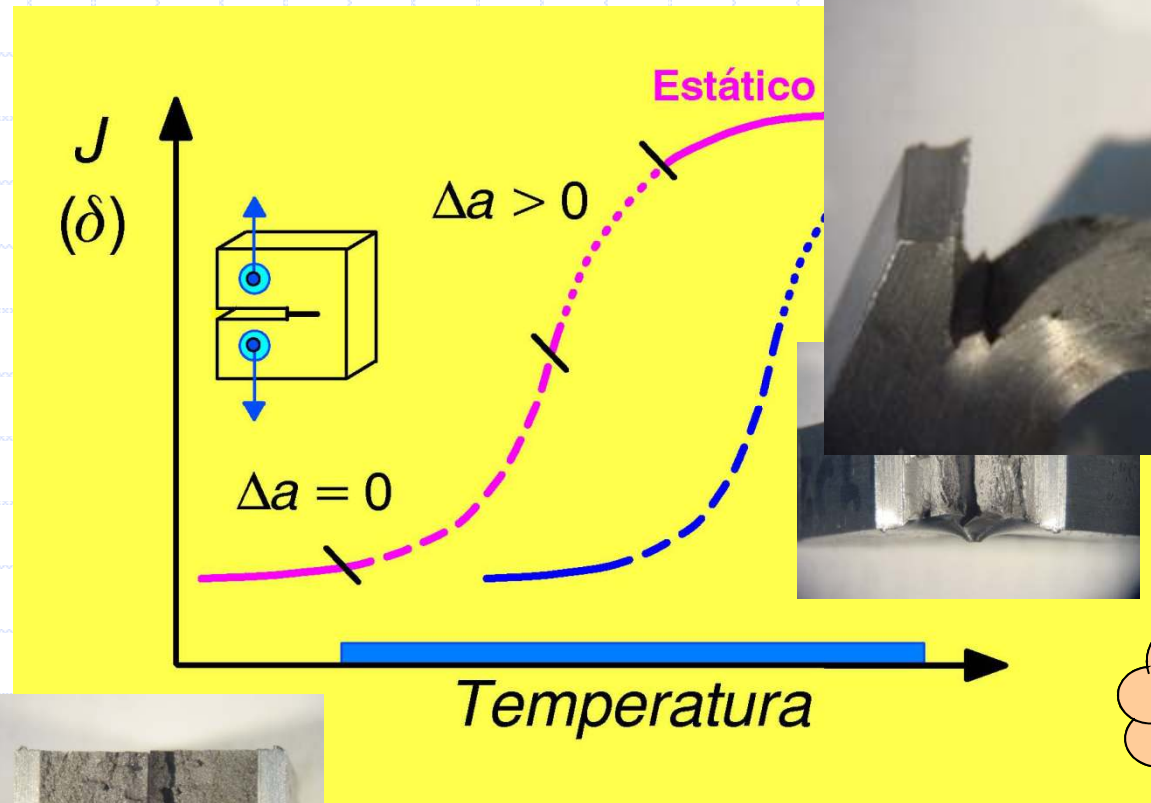
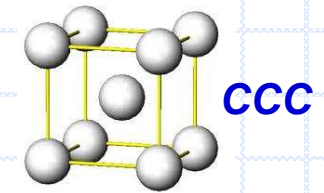


Frágil + Dúctil

→  
Tira



# Transição Frágil-Dúctil



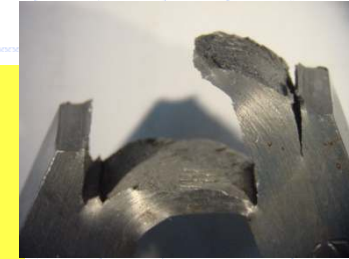
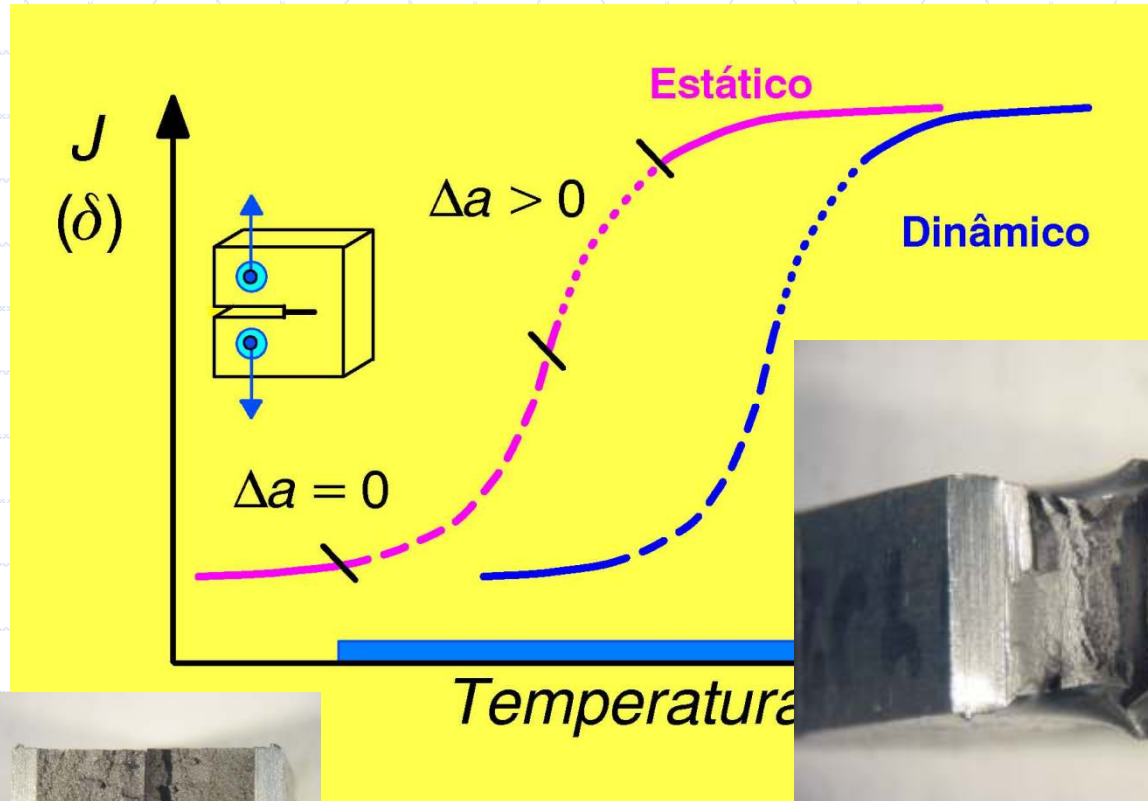
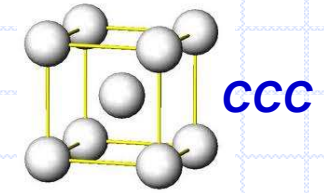
Dúctil

Frágil + Dúctil



Frágil

# Transição Frágil-Dúctil



Dúctil

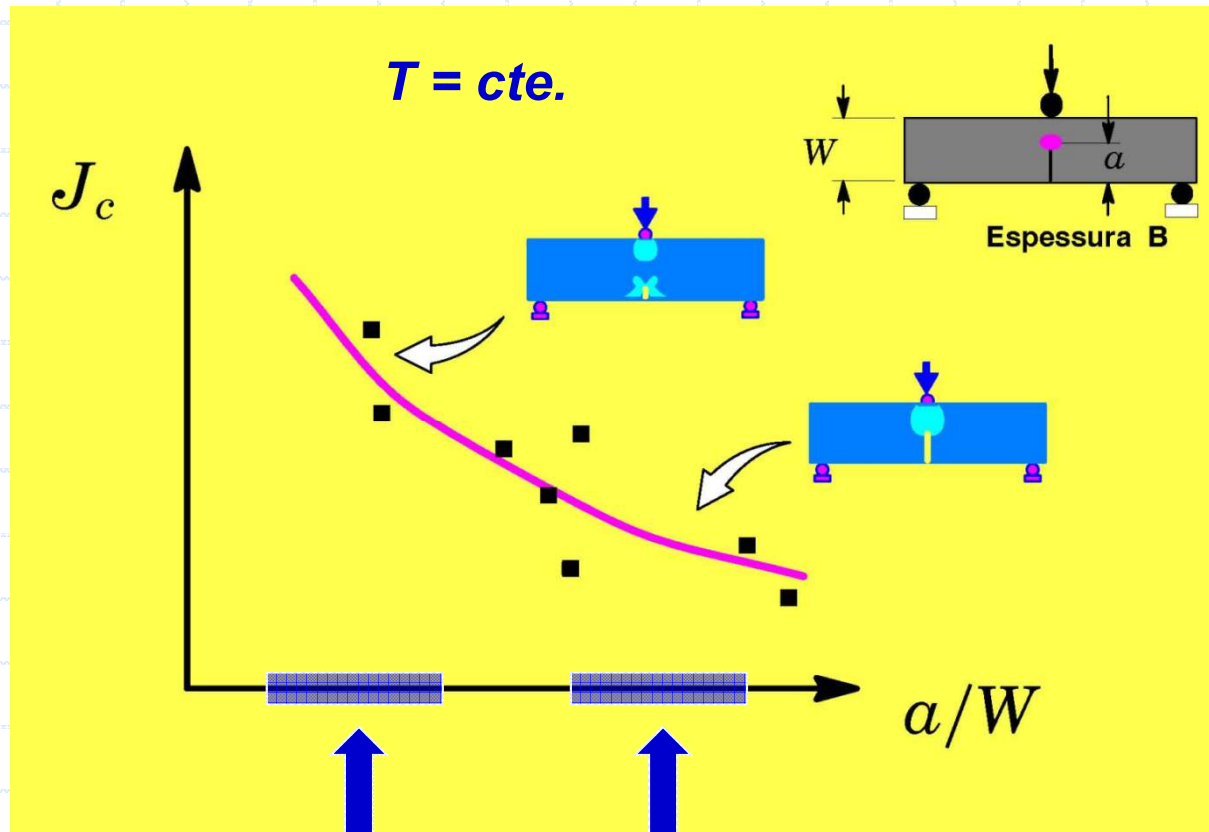


Frágil + Dúctil



Frágil

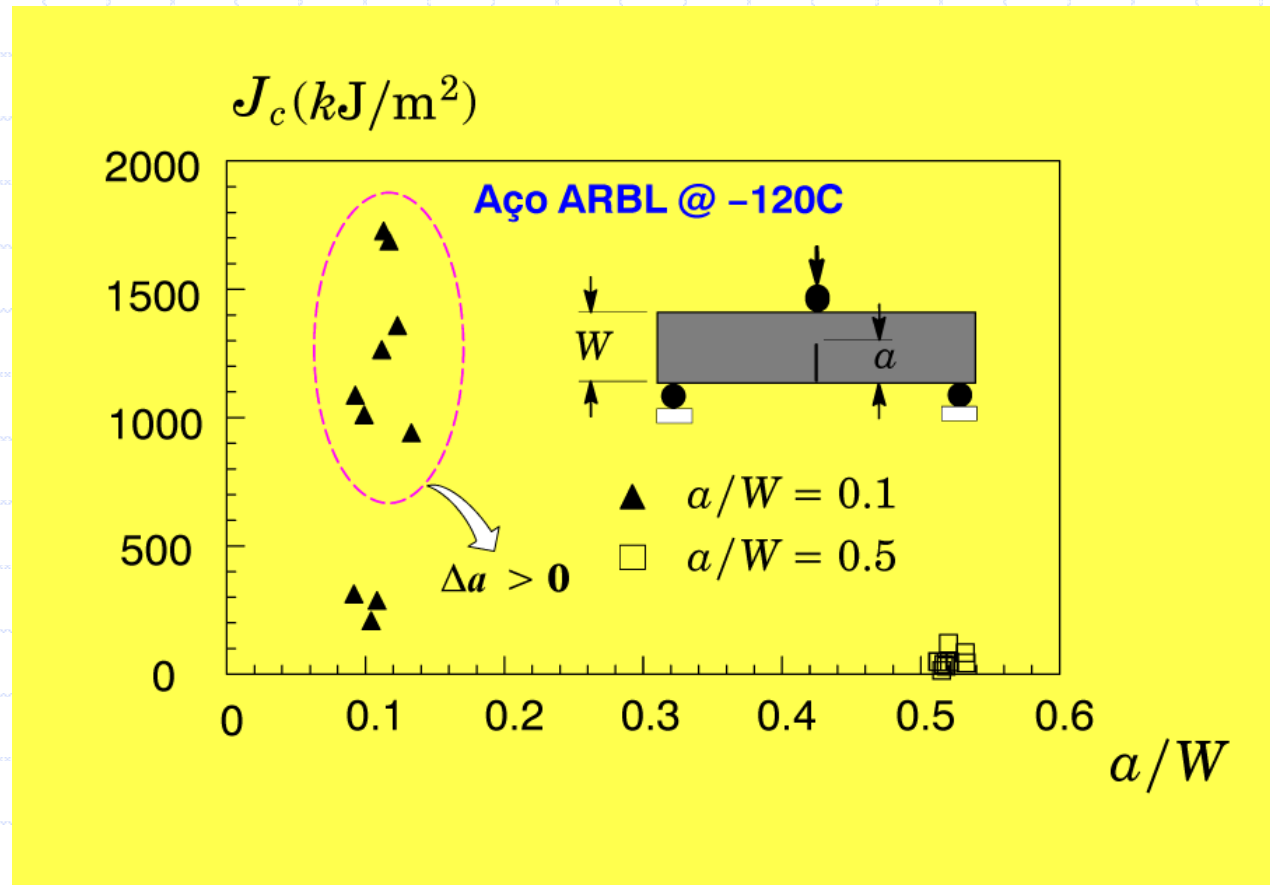
# Efeitos Geométricos Sobre a Tenacidade



Geometria Típica em Componentes Estruturais

Geometria Utilizada em Espécimes Padronizados (e.g. ASTM 1820)

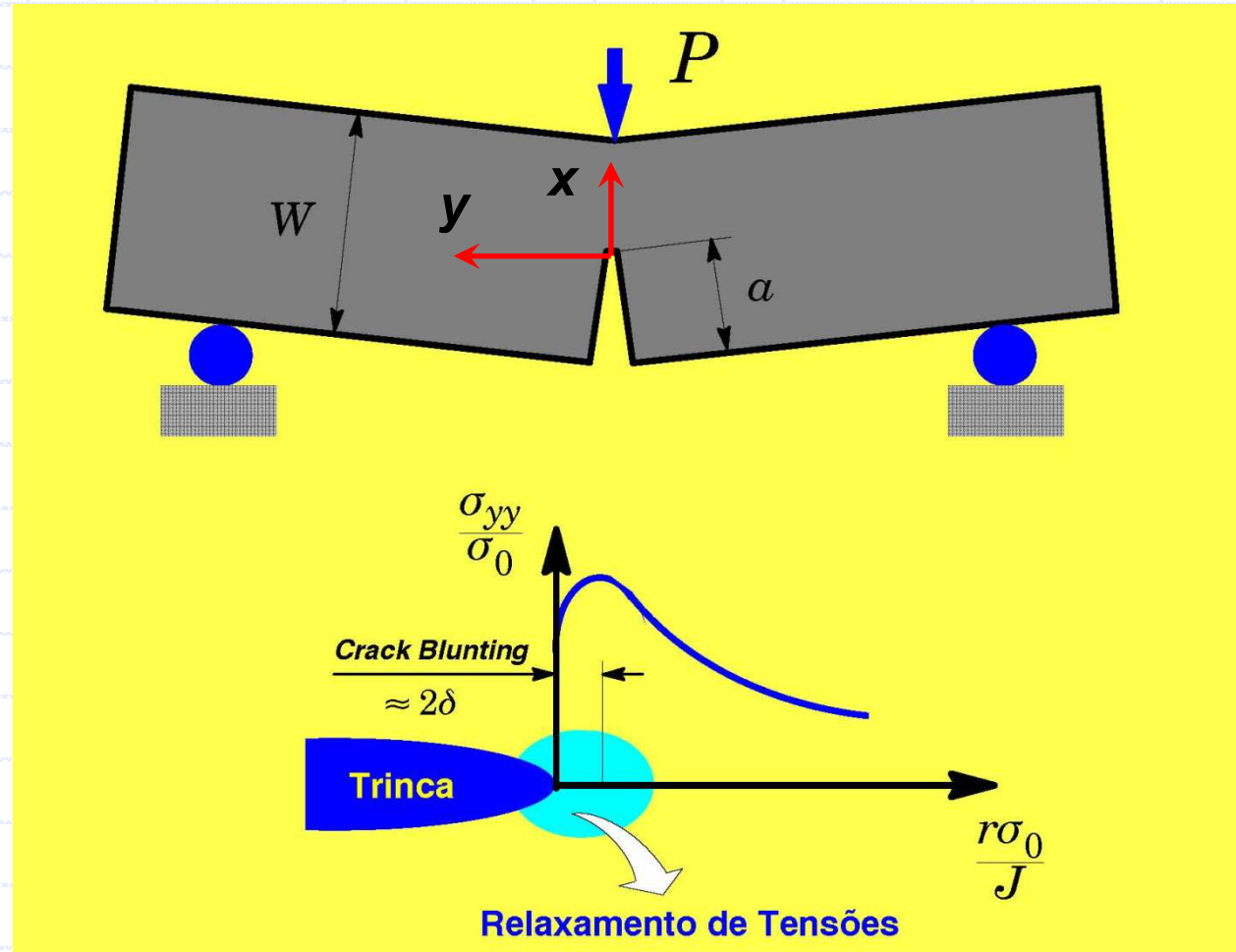
# Efeitos Geométricos Sobre $J_c$



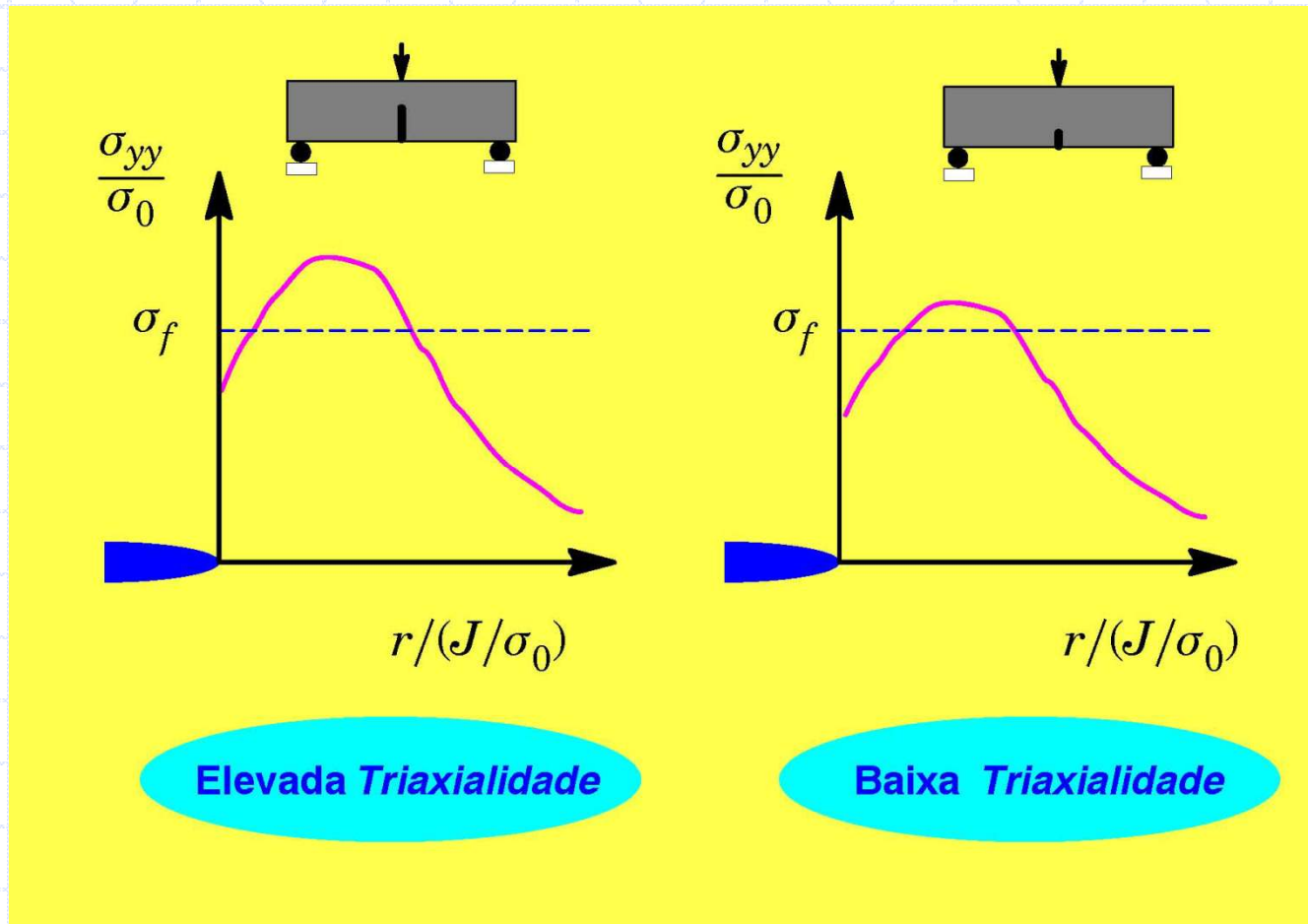
Ohata, Ruggieri e Toyoda (1993)



# Relaxamento de Tensões



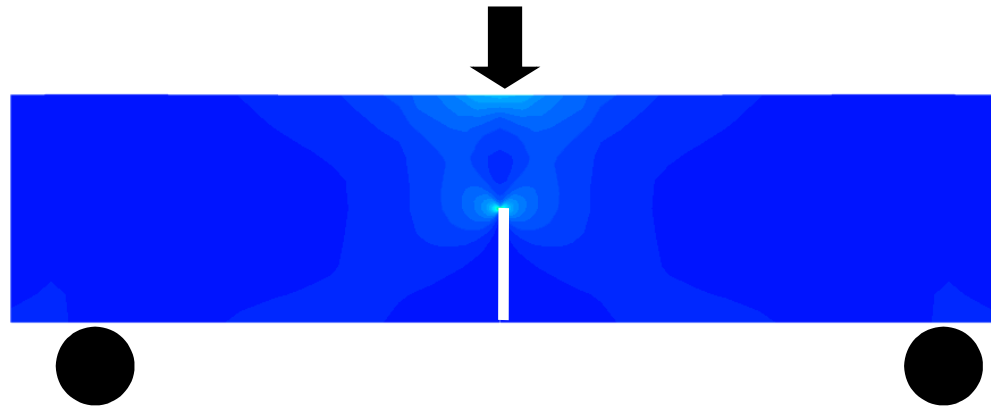
# Campo de Tensões vs. Geometria



# Evolução de Tensões Elasto-Plásticas (*von Mises*)

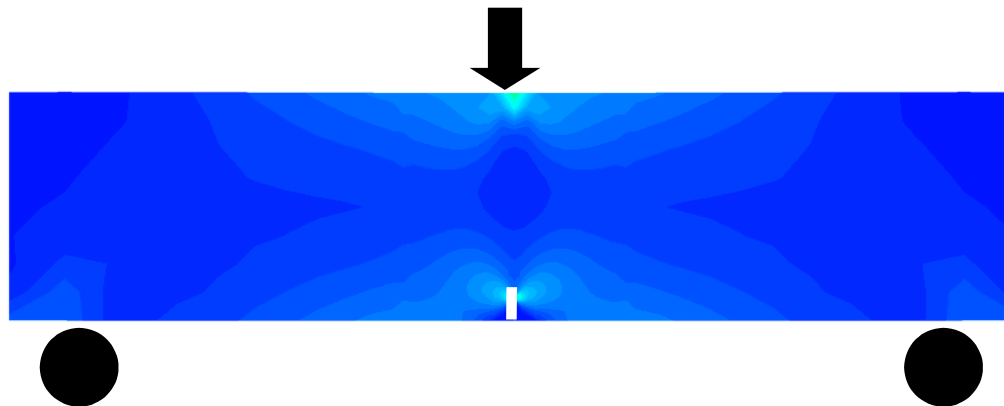
Defeito “Profundo”

3P SE(B) -  $a/W=0.5$

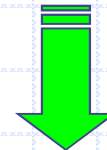
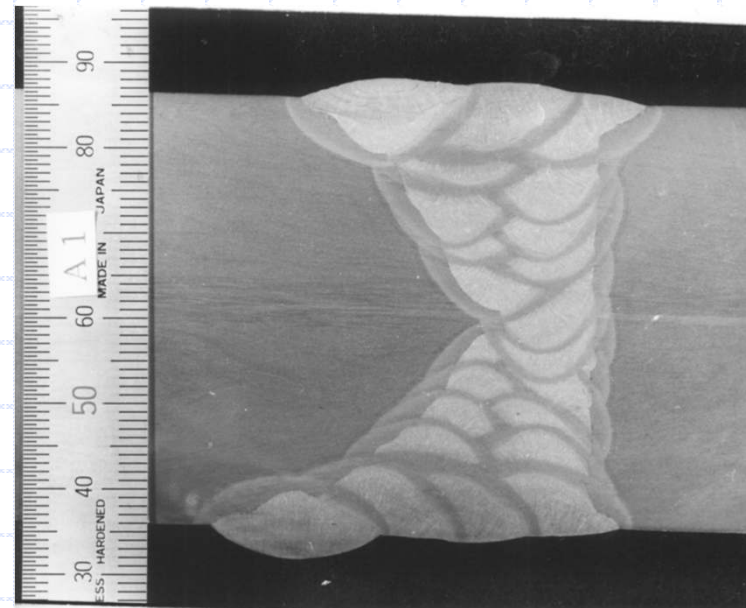
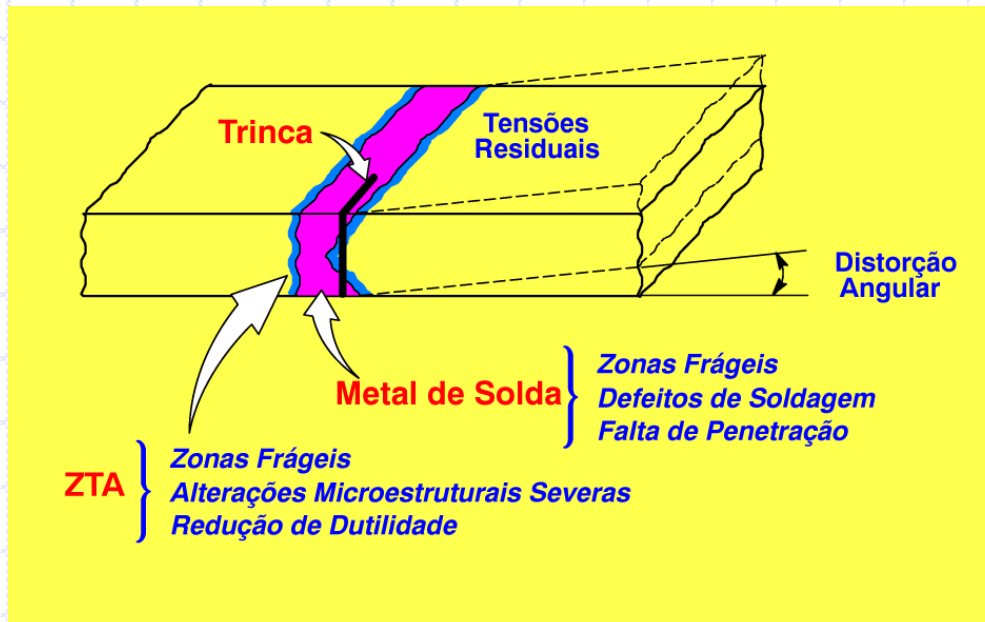


Defeito “Raso”

3P SE(B) -  $a/W=0.1$



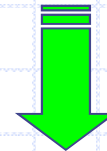
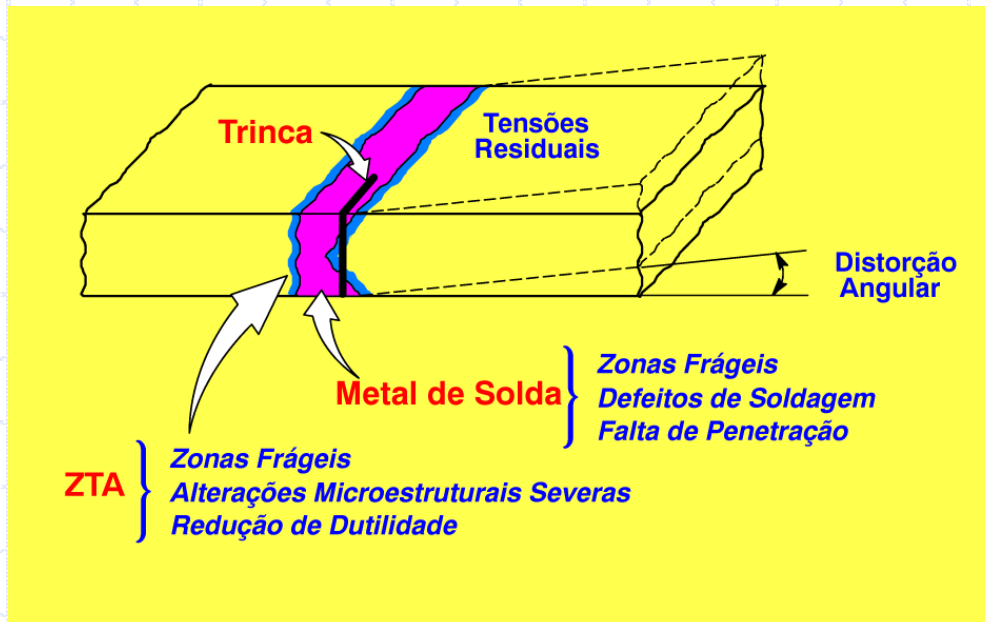
# Resistência à Fratura de Juntas Soldadas



- Heterogeneidades Microestruturais (Regime Local)
- Dissimilaridade Mecânica MB / MS (Regime Global)

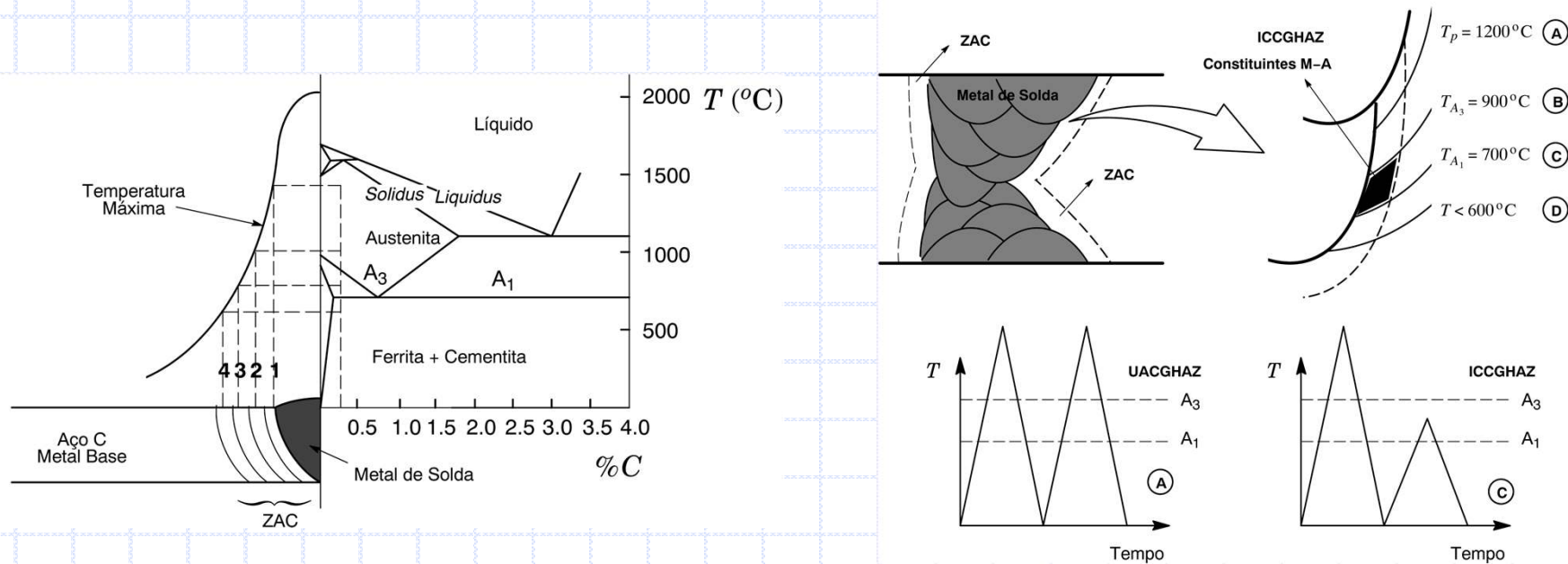


# Resistência à Fratura de Juntas Soldadas



- Heterogeneidades Microestruturais (Regime Local)
- Dissimilaridade Mecânica MB / MS (Regime Global)

# Ciclo Térmico em Juntas Soldadas



- Grande Incidência de Zonas Frágeis Localizadas
- Significância do Parâmetro de Fratura ?

# Limitações de Métodos Convencionais

- *Falha Estrutural é um Fenômeno Extremamente Localizado Dificultando uma Abordagem Puramente Contínua (Global)*
- *Grande Relevância dos Efeitos de Triaxialidade de Tensões e Limitações da Abordagem Monoparamétrica*
- *Natureza Fortemente Sinérgica entre Características Microestruturais e o Regime Global do Componente Estrutural*



**Metodologias Micromecânicas ou Locais**

# Escopo

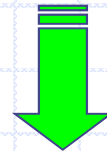
- *O Problema de Falhas Estruturais em Componentes Críticos Revisitado*
- *Metodologias Correntes Baseadas em Mecânica do Contínuo para Avaliação de Defeitos em Componentes Estruturais*
- *Limitações, Aplicabilidades e Aspectos Multidisciplinares*
- ***Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Micromecânicos (Local Approaches)***



# Abordagens Micromecânicas

**Células  
Computacionais  
(Regime Dúctil)**

**Tensão de  
Weibull  
(Regime Frágil)**

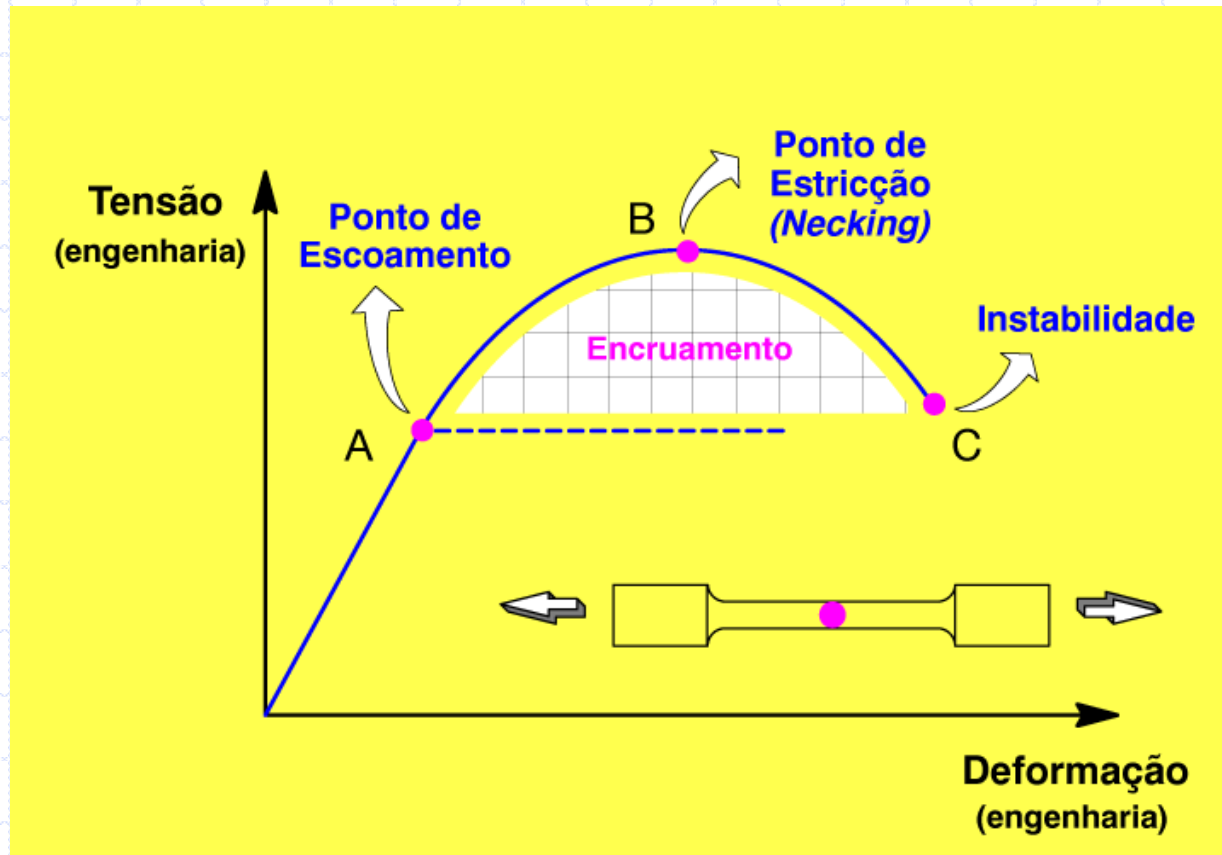


- **Acoplamento dos Regimes Local e Global**
- **Incorpora Características Essenciais do Regime de Falha Considerado**
- **Inerentemente Adequado a Modelagens Numéricas e Computações em Larga Escala**

# Modelo de Células Computacionais

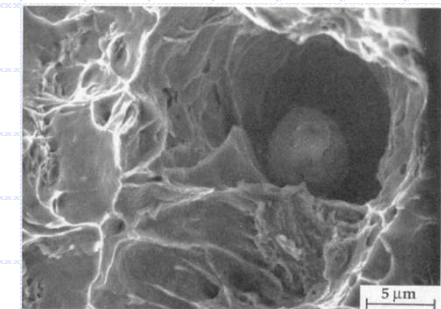
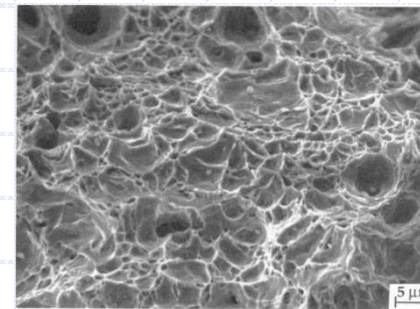
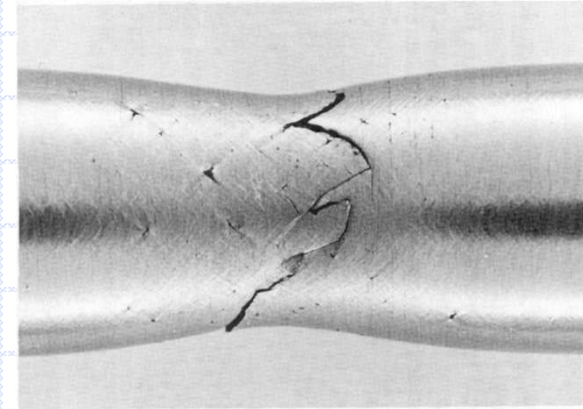
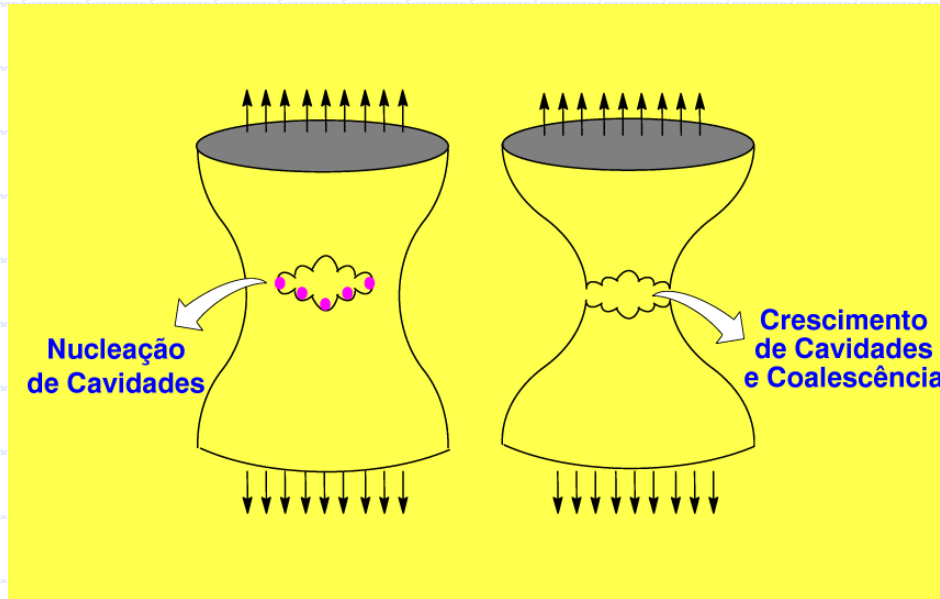
- *Desenvolvido por Xia & Shih (Brown University, 1995) e Ruggieri & Dodds (University of Illinois, 1996) para Descrever a Propagação de Defeitos em Componentes Estruturais de Materiais Dúcteis*
- *Código de Elementos Finitos Não Linear WARP3D (Koppenhauser & Gullerud & Ruggieri & Dodds, 1994/98)*
- *Extensão Metodológica Aplicada à Propagação de Defeitos e Previsão da Pressão de Ruptura (Burst) em Componentes Pressurizados Esbeltos (Dutos de Gás): Hippert & Ruggieri (2001), Dotta & Ruggieri (2003, 2006), Cravero & Ruggieri (2006), Ruggieri (2009)*

# Características Macroscópicas



Descrição Fenomenológica a Partir do Regime “Global”

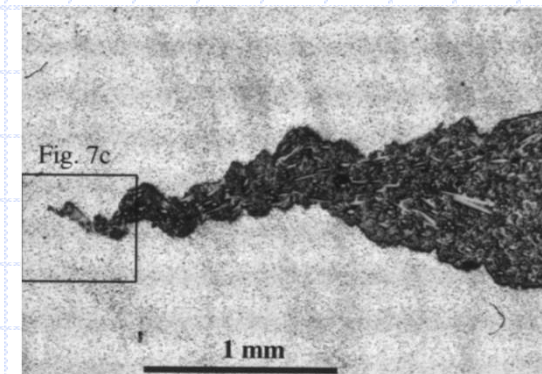
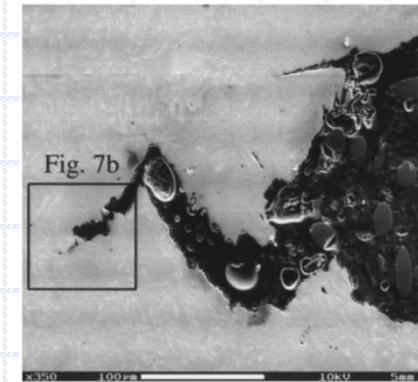
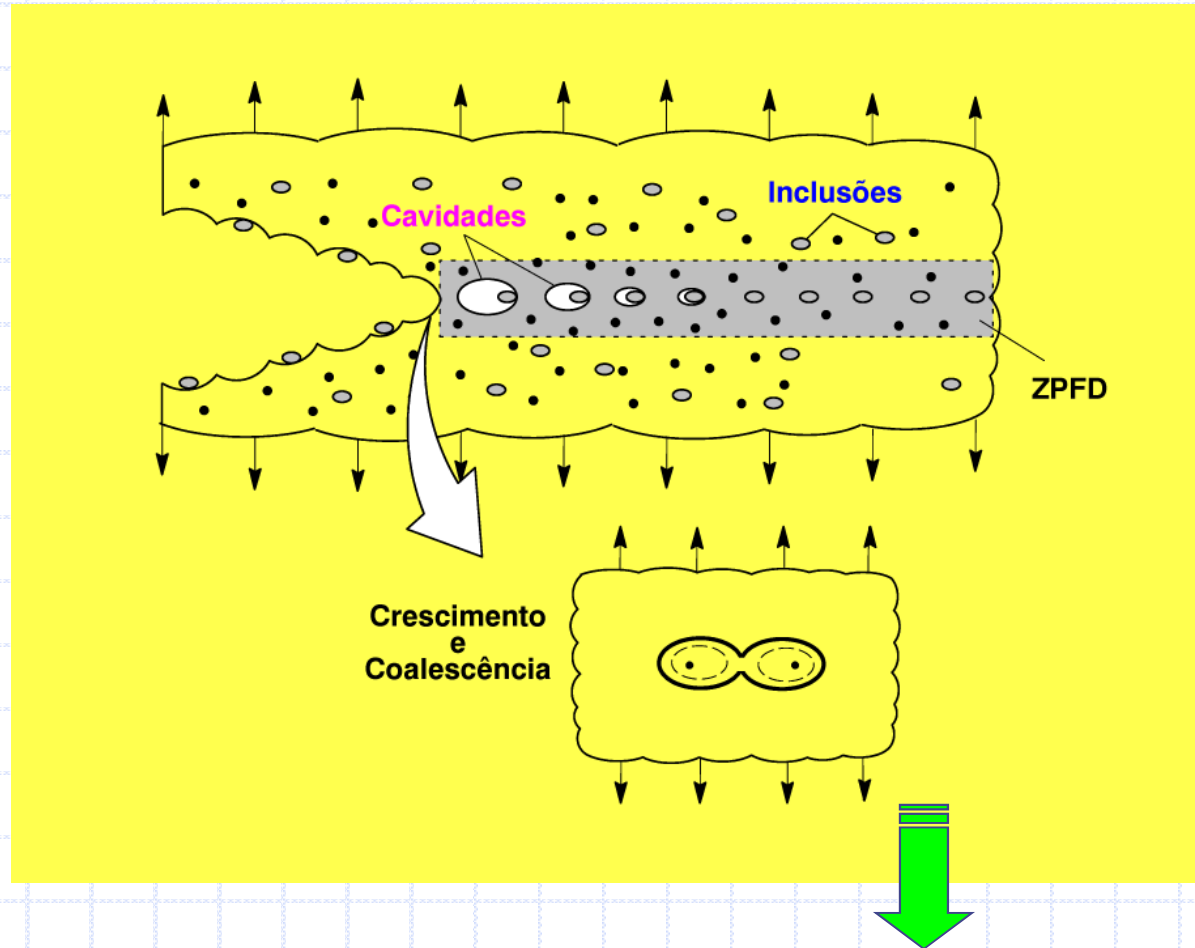
# Aspectos Fenomenológicos



**Descrição Mecanística do Fenômeno Dominante**

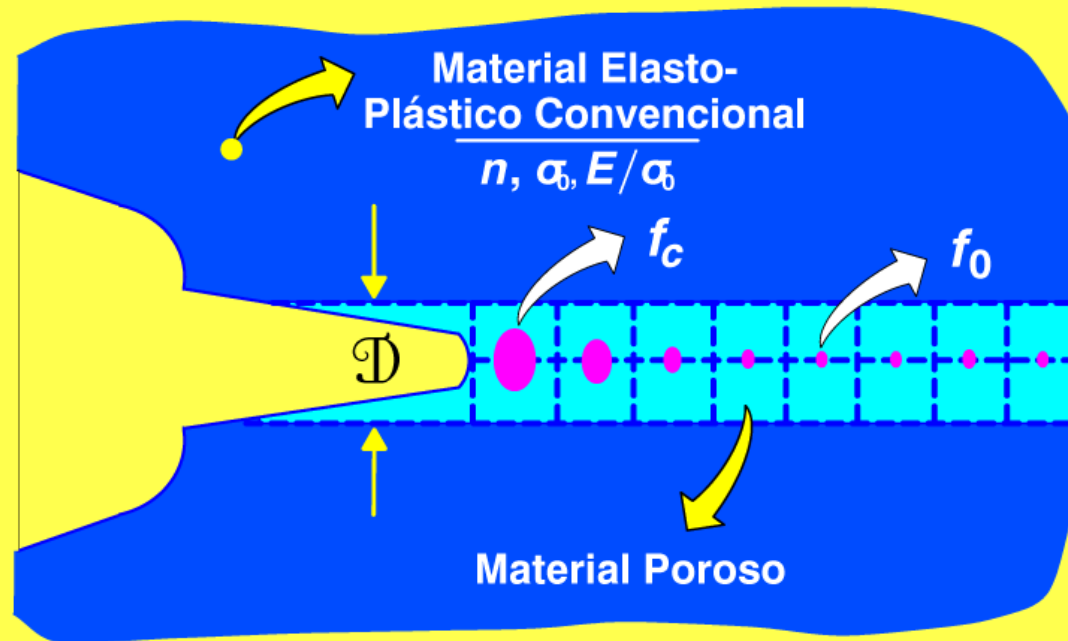


# Modelo de Fratura Dúctil ("Rasgamento")



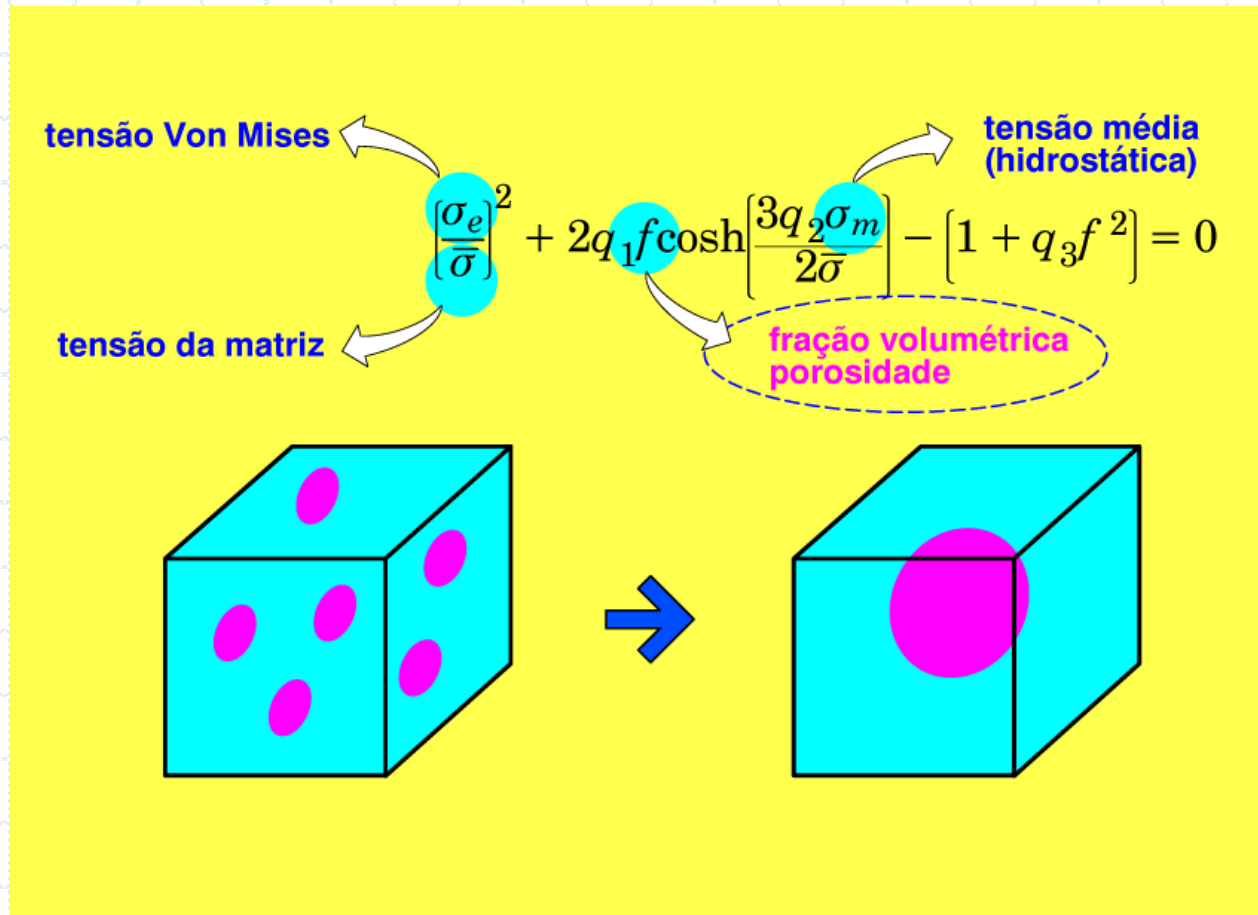
**Governado por Crescimento e Coalescência de Cavidades**

# Células Computacionais



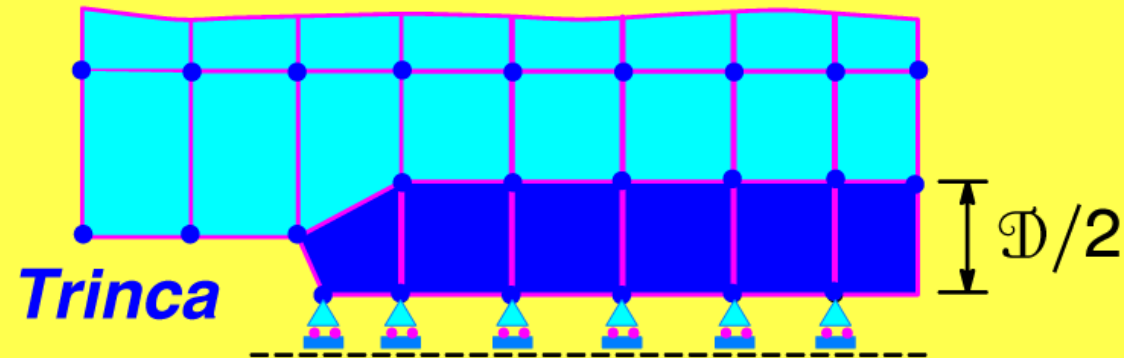
**Modelo Micromecânico com Dimensão Linear Explícita**

# Modelo de Gurson-Tvergaard



Descrição Mecânica do Fenômeno Dominante

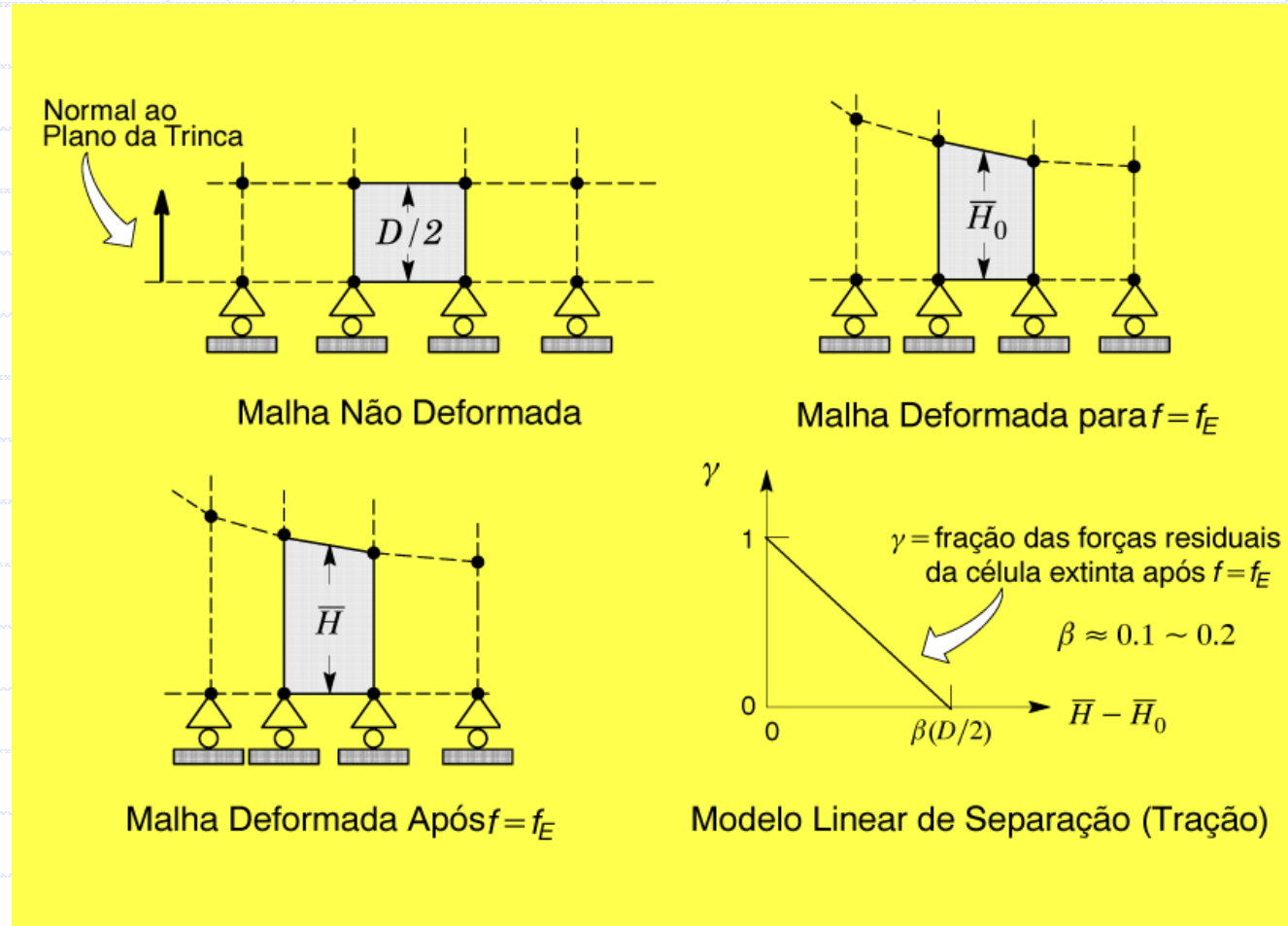
# Implementação Numérica



- ▶ Calibrar  $f_0$ ,  $\mathcal{D}$  Usando Curvas  $J-\Delta a$  para Corpos-de-Prova Convencionais de Fratura.
- ▶ Usar Valores Calibrados para *PREVER* Curvas  $J-\Delta a$  para Outras Geometrias.

**Código de Elementos Finitos Não Linear WARP3D**  
(Koppenhauser & Gullerud & Ruggieri & Dodds, 1994)

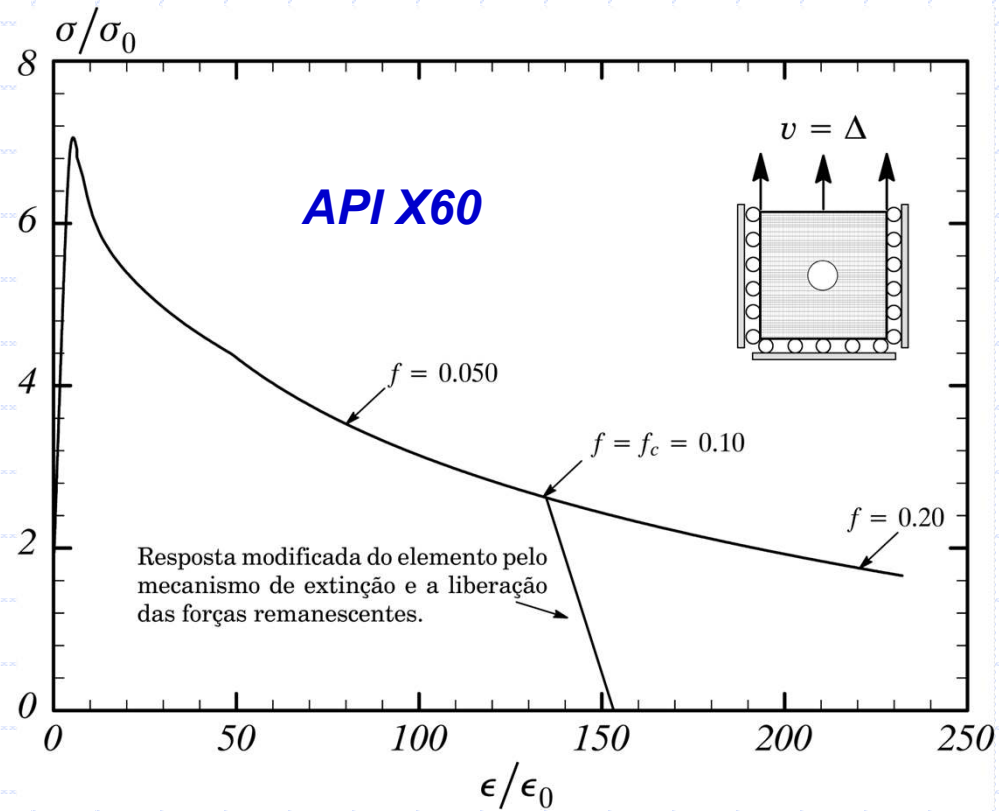
# Avanço Físico da Trinca



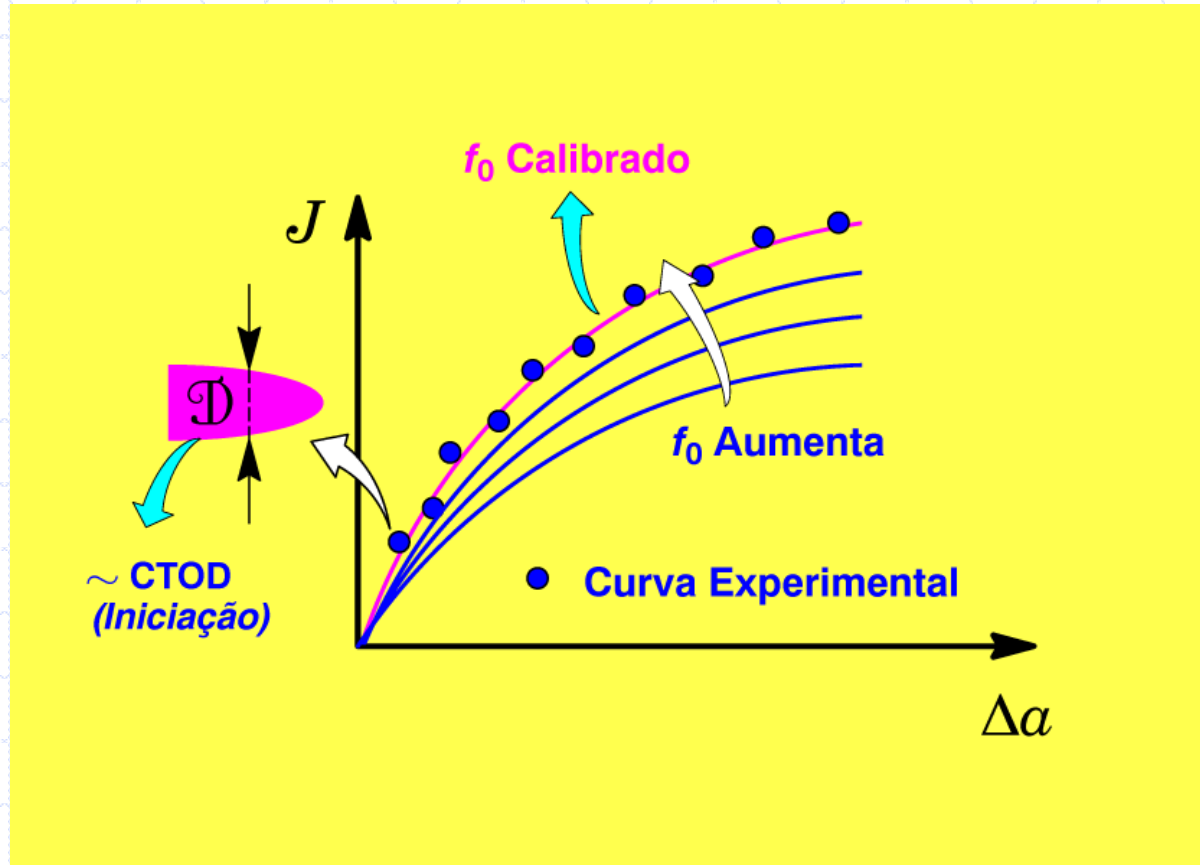
## Criação de Novas Faces da Trinca em Propagação



# Célula Unitária



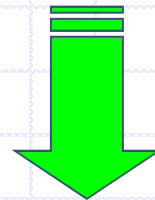
# Calibração Paramétrica



**Utiliza Curvas de Resistência Experimentais  $J-R$   
(Espécimes Padronizados C(T) ou SE(B))**

# Aplicação

- *Ensaio Mecânico e de Tenacidade em um Aço API 5L X60 e X70 para Medição Experimental das Curvas de Resistência J-R*
- *Calibração Paramétrica do Modelo de Células Computacionais*
- *Capacidade Preditiva do Modelo*



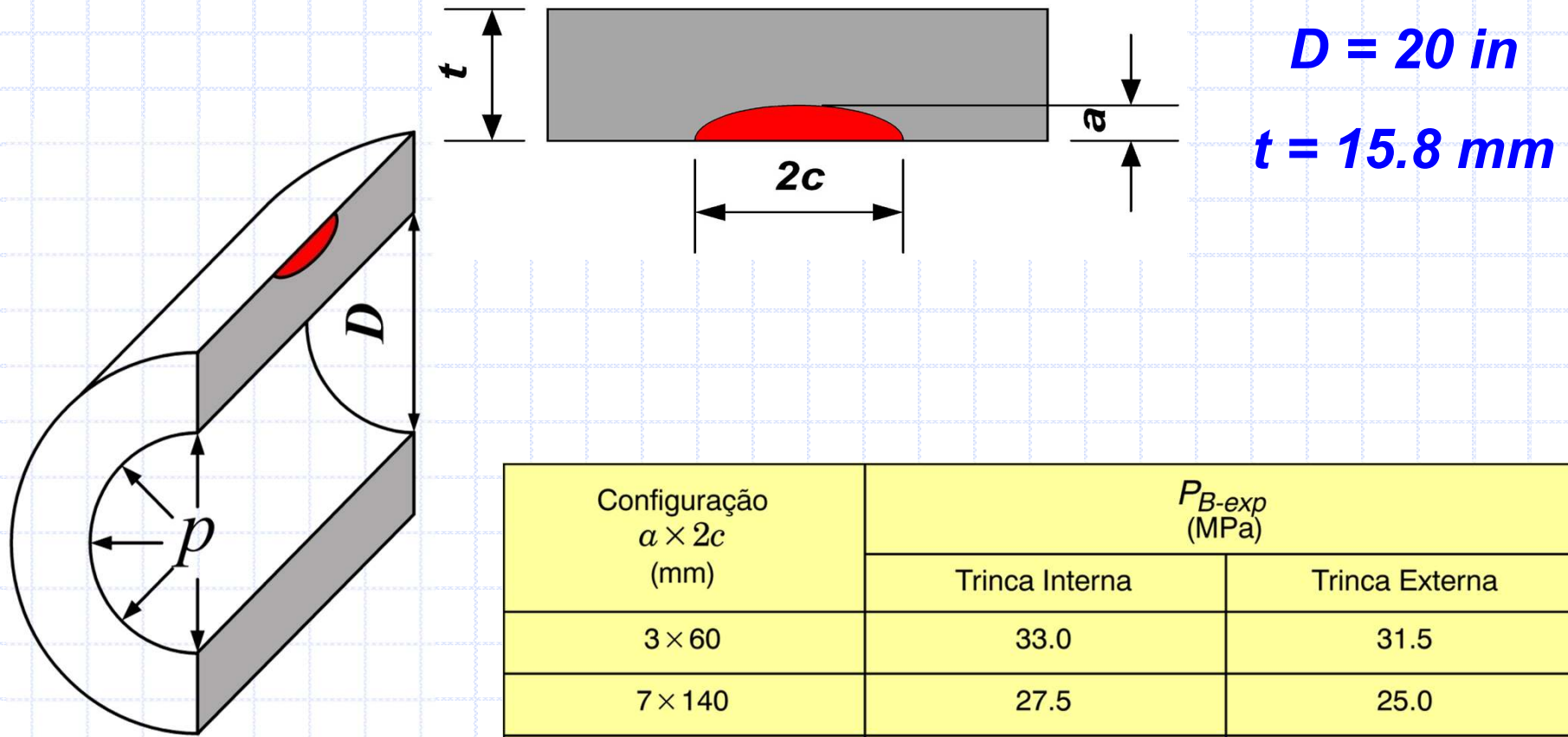
*Previsão da Pressão de Ruptura em Dutos Contendo Defeitos Axiais (Longitudinais)*

# Motivação



- **Aumento Significativo das Facilidades para Produção e Transporte de Petróleo e Gás**
- **Envelhecimento da Infraestrutura Existente e Reabilitação**

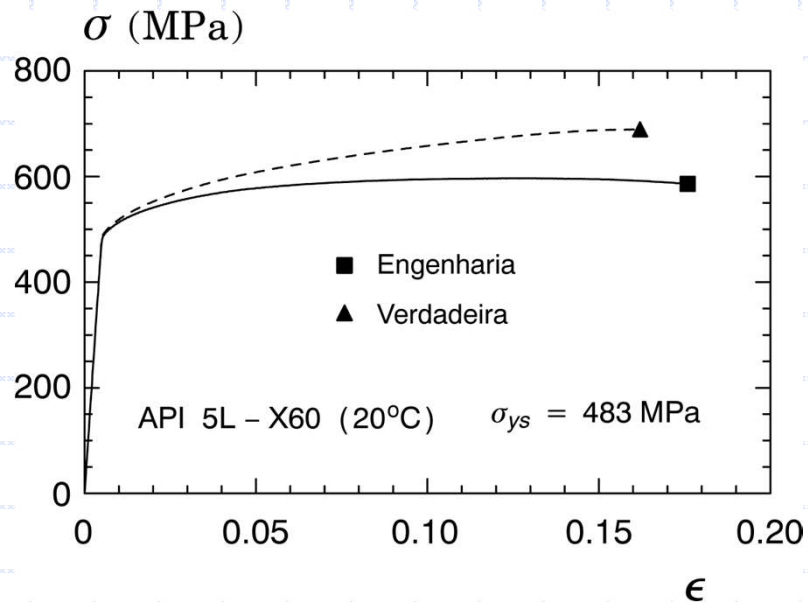
# Programa Experimental



Configuração $a \times 2c$ (mm)	$P_{B-exp}$ (MPa)	
	Trinca Interna	Trinca Externa
3 × 60	33.0	31.5
7 × 140	27.5	25.0
10 × 200	22.0	21.0



# Programa Experimental

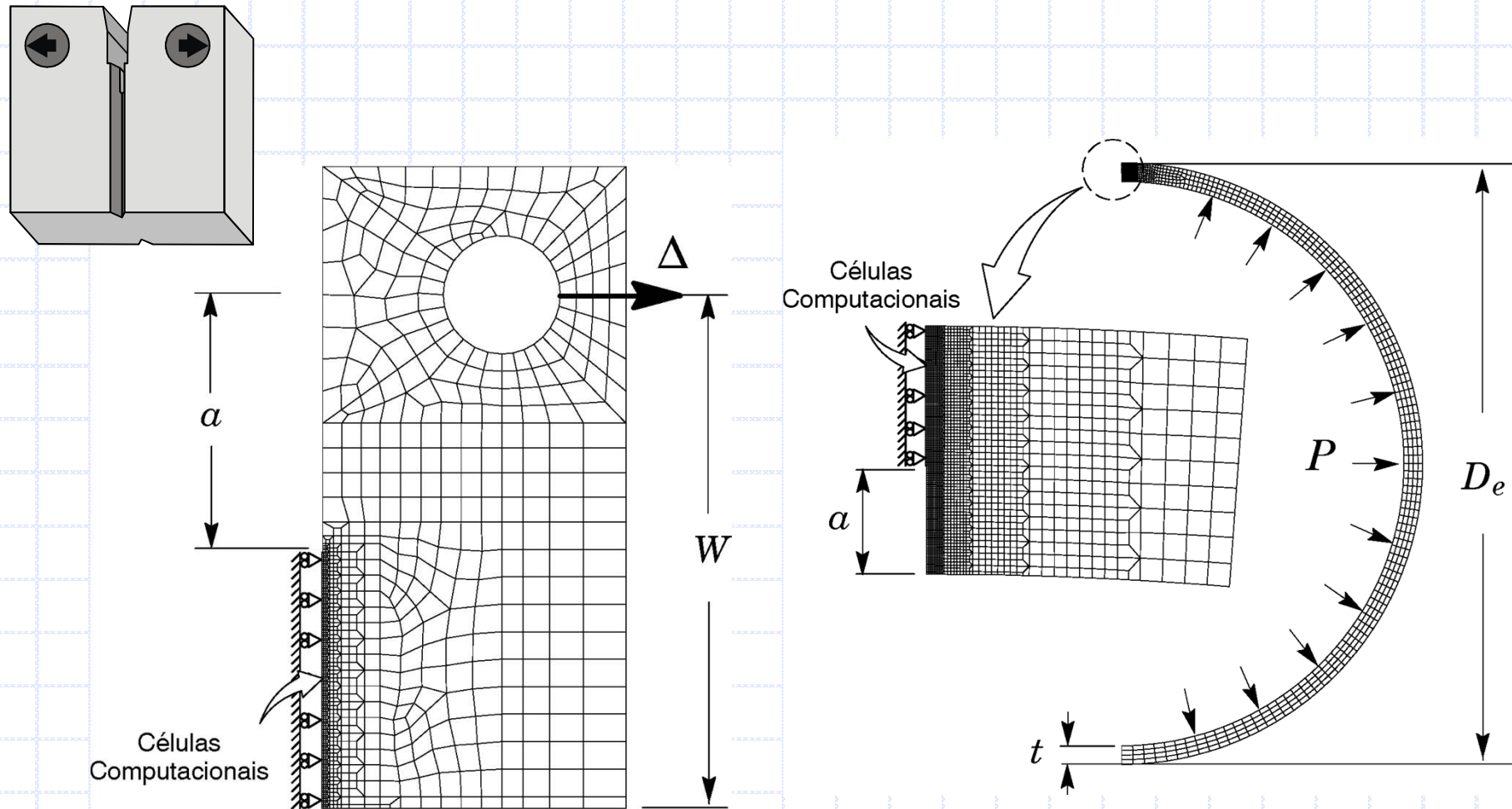


- **American Petroleum Institute, Specification for Line Pipe (API 5L)**
- **Aço Grau X60 ( $\sigma_{ys} = 483$  MPa) Tipicamente Utilizado em Gasodutos (Encruamento Moderado  $\rightarrow n_{RO} = 10 \sim 12$ )**

# Testes Hidrostáticos

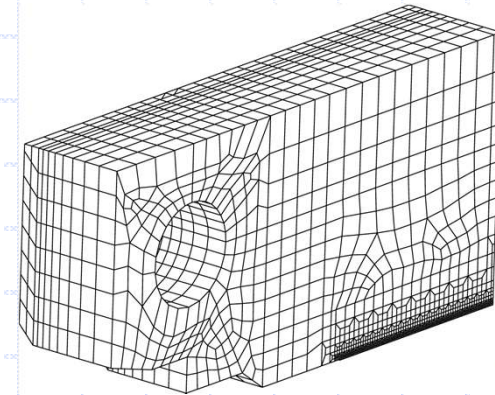
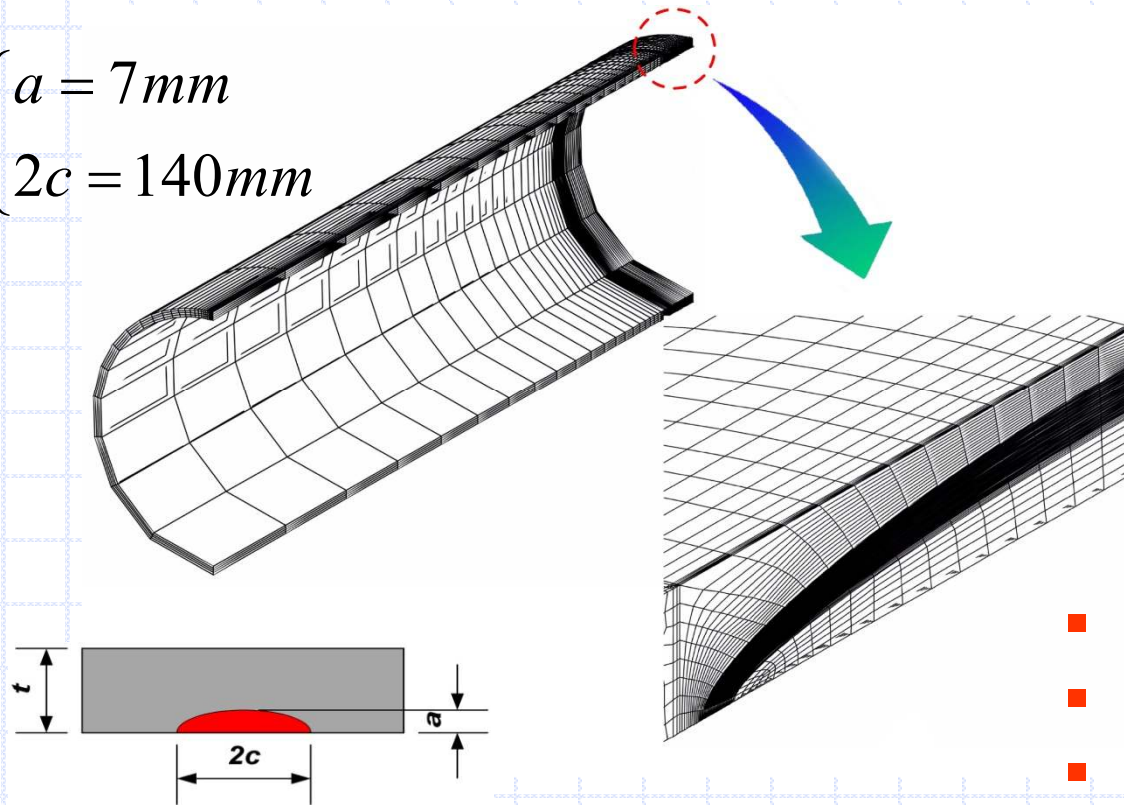


# Modelos de Elementos Finitos 2D



# Modelos de Elementos Finitos 3D

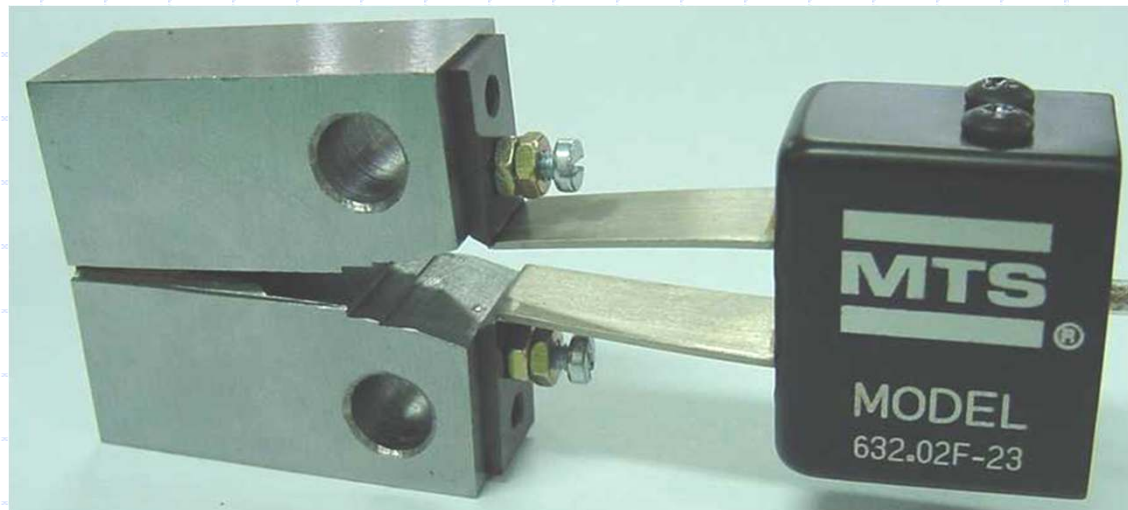
$$\begin{cases} a = 7\text{mm} \\ 2c = 140\text{mm} \end{cases}$$



- 39094 nós
- 34794 elementos
- 1000 células (GT)
- 16h CPU (SGI)

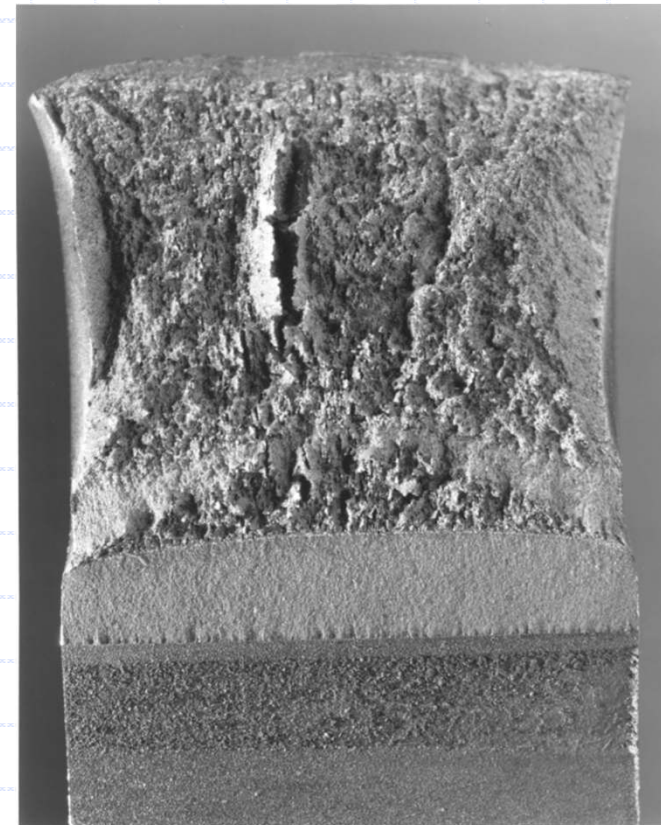
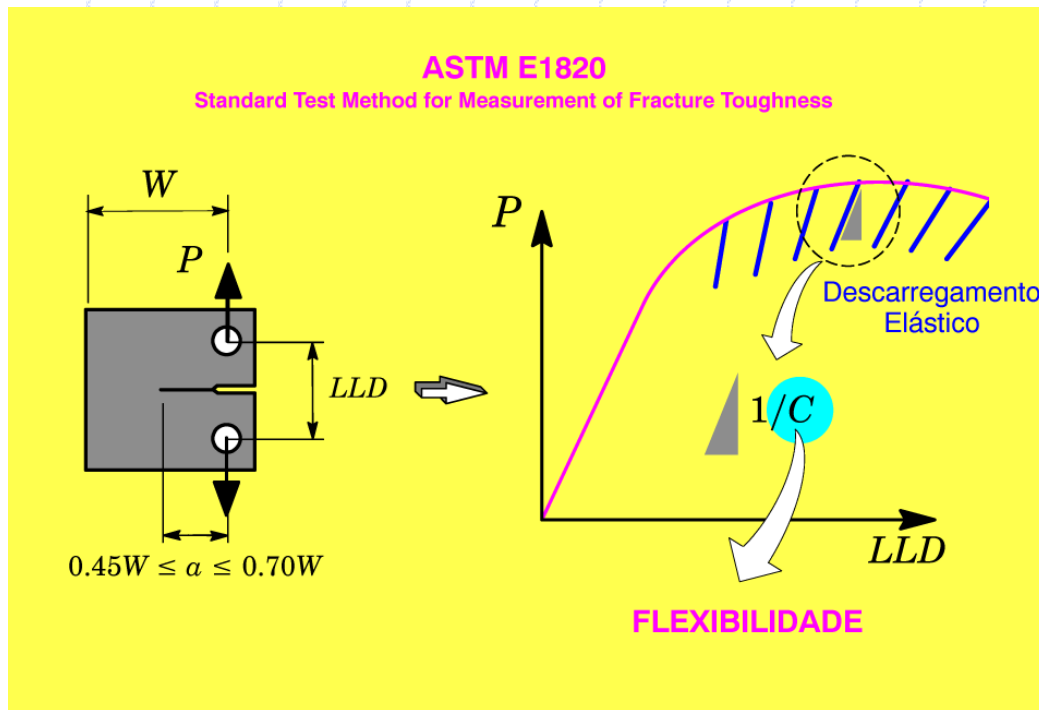


# Medição Experimental de Curvas J-R

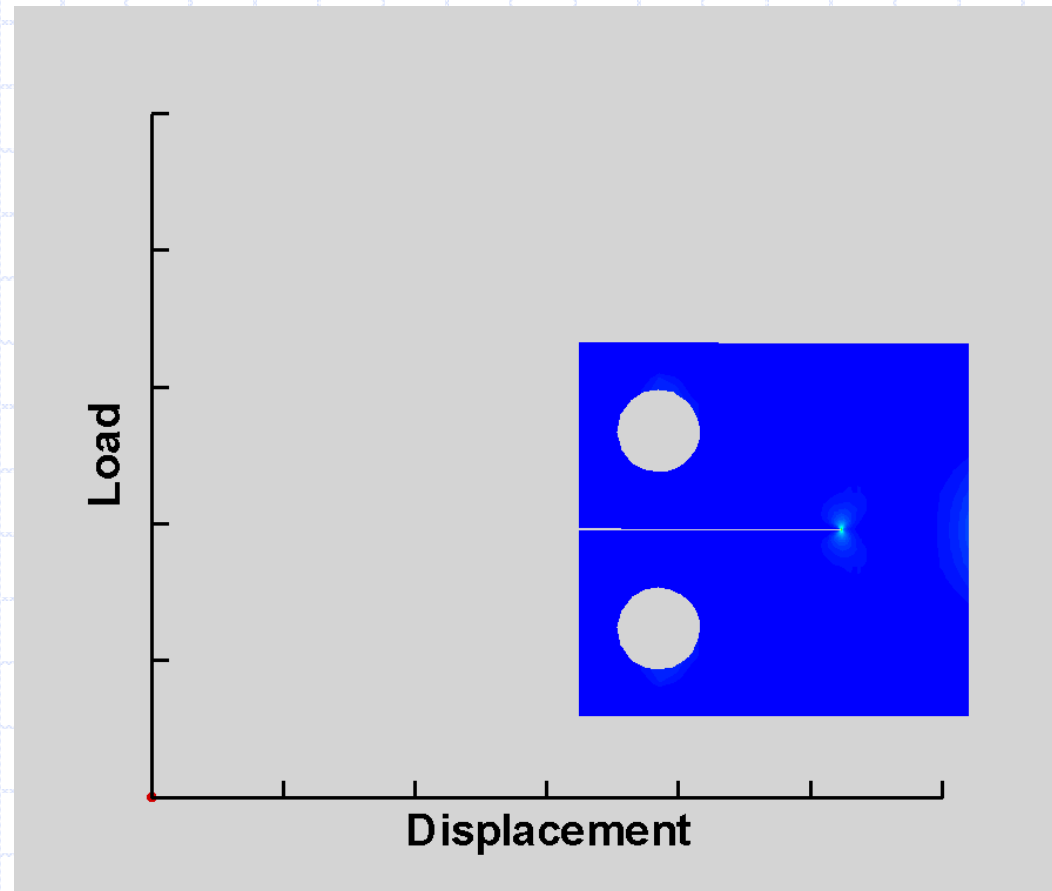




# Medição Experimental de Curvas J-R

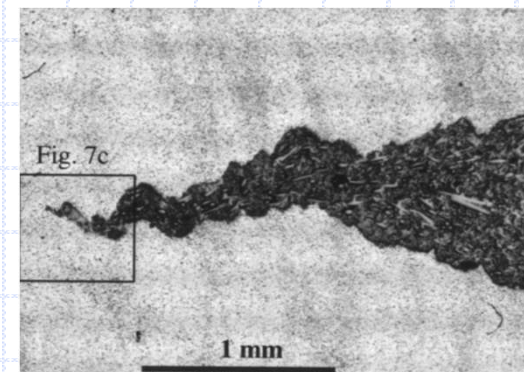
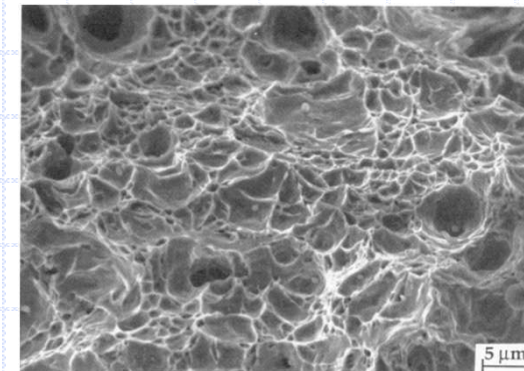
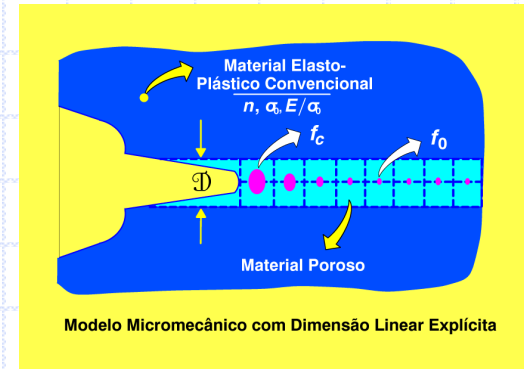
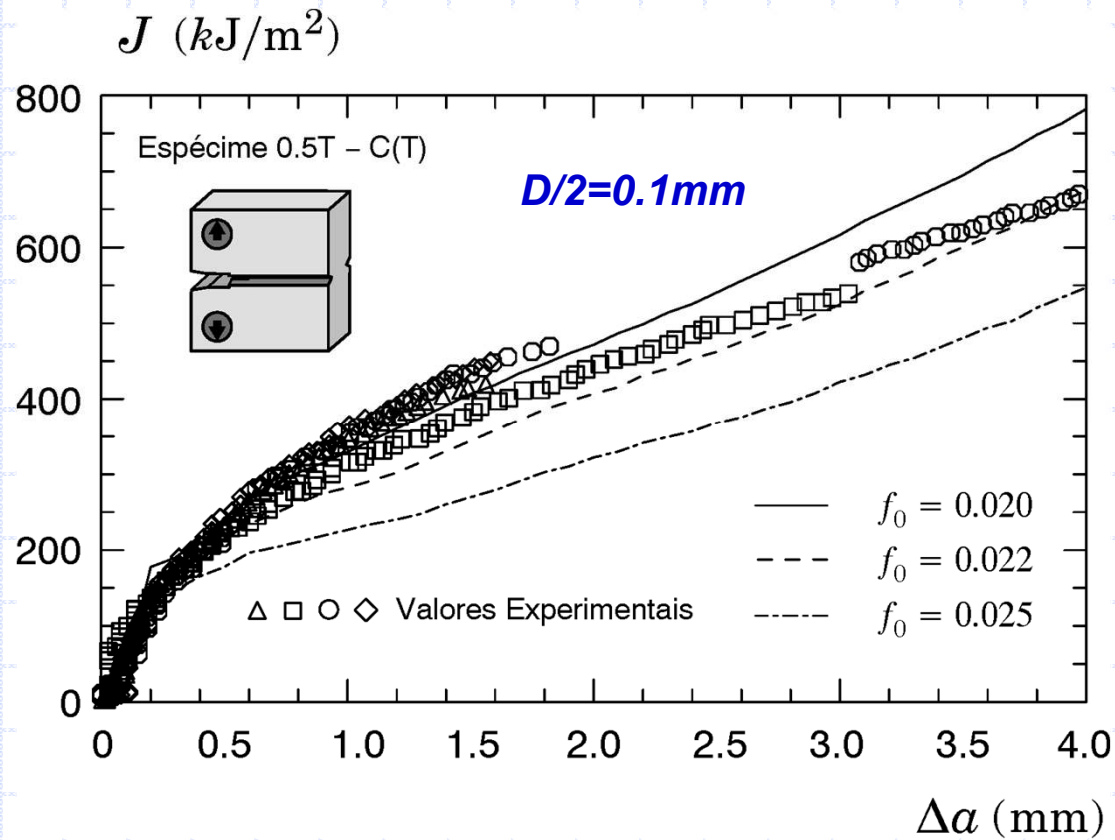


# Medição Experimental de Curvas J-R

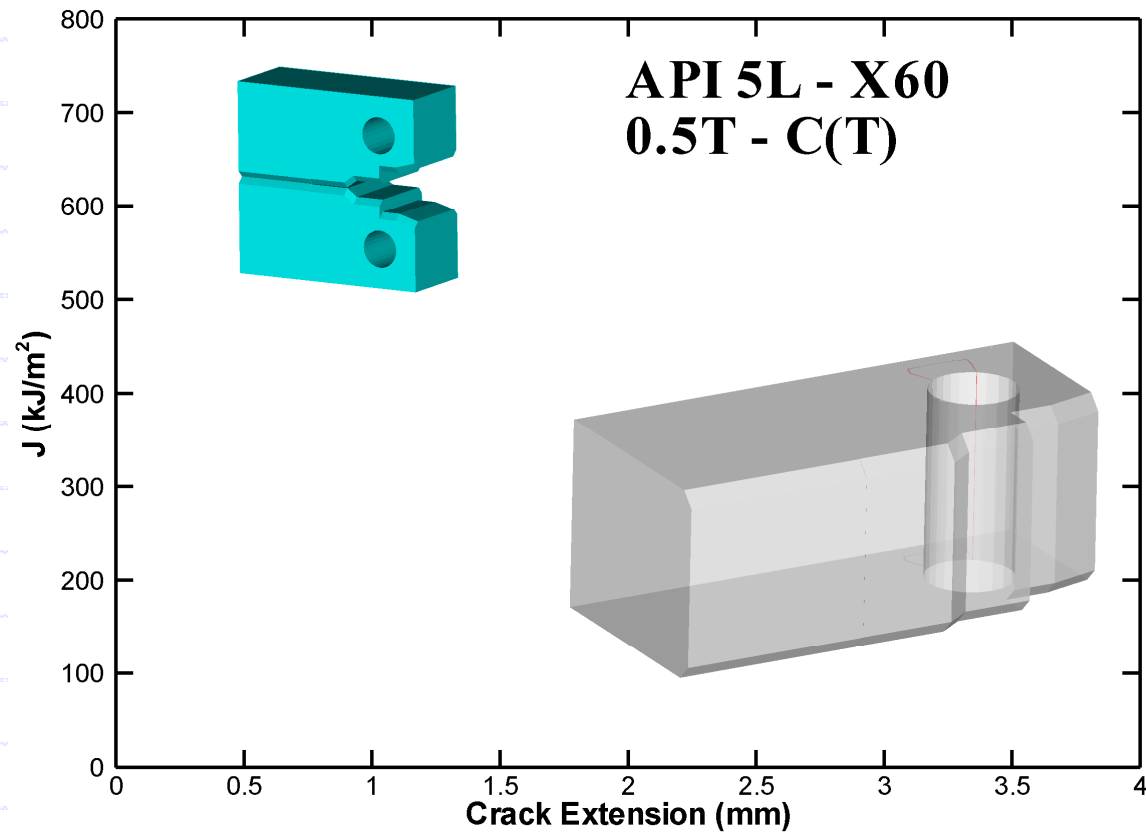


***Método da Flexibilidade no Descarregamento***

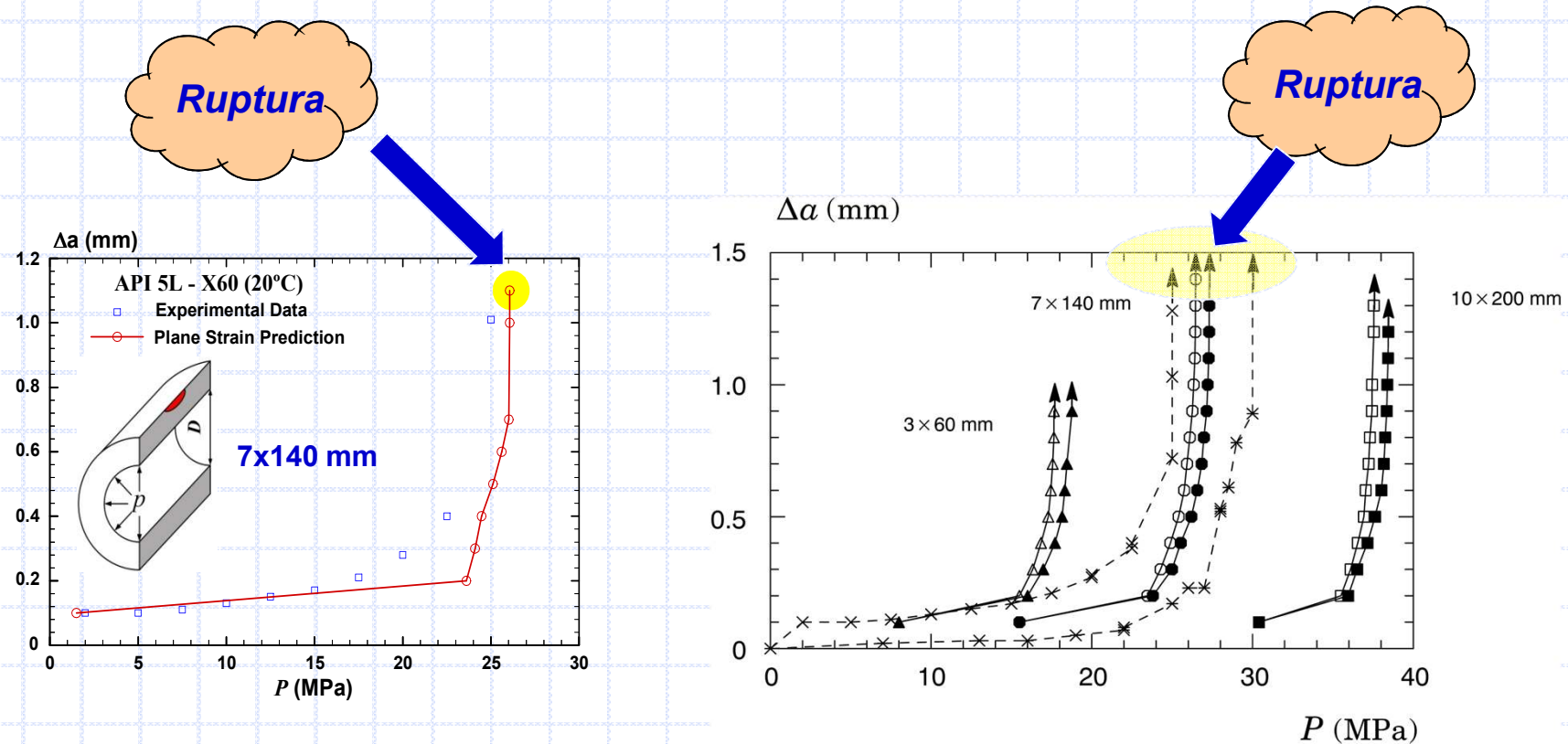
# Curvas de Resistência J-R



# Simulação Numérica (WARP3D)



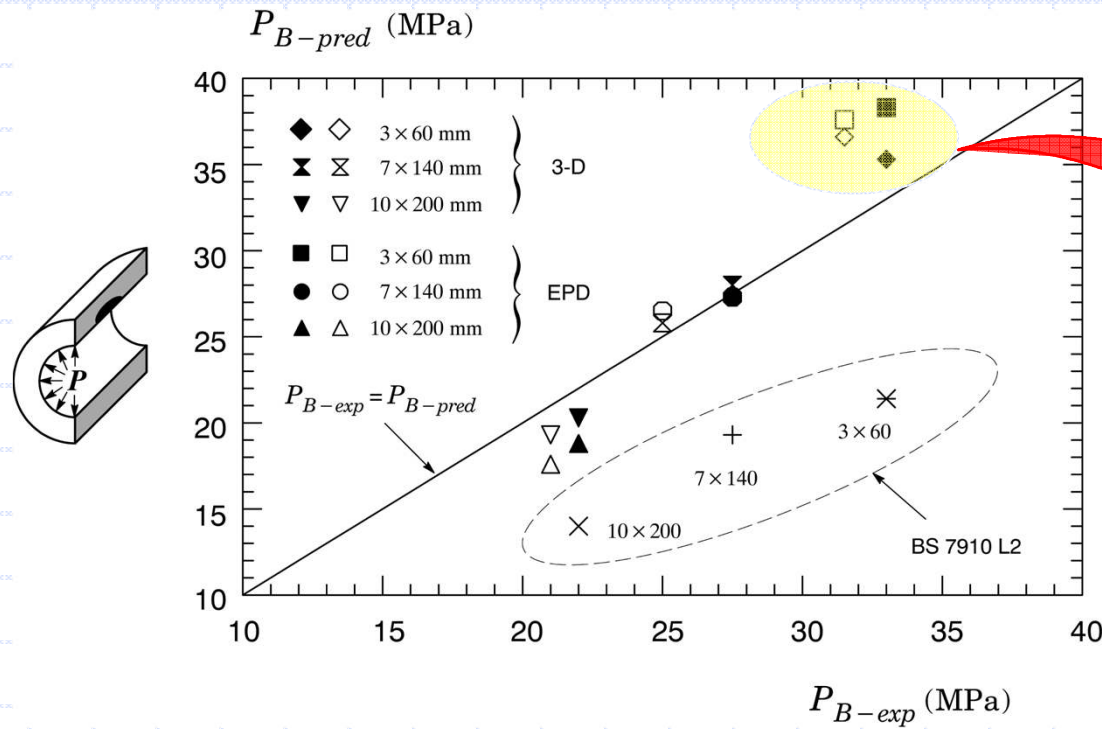
# Evolução do Crescimento Dúctil (2D)



- **Pequeno Crescimento da Trinca Devido a Redistribuição de Esforços de Membrana sobre a Seção Resistente do Tubo**
- **Rápido Crescimento da Trinca Para Pequenos Incrementos de Pressão (Similar à Condição de Carga Limite)**



# Previsões da Pressão de Ruptura



**Resposta do Modelo GT  
sob Baixa Triaxialidade  
de Tensões**

$$\left(\frac{\sigma_e}{\bar{\sigma}}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left[\frac{3q_2 \sigma_m}{2\bar{\sigma}}\right] - [1 + q_3 f^2] = 0$$

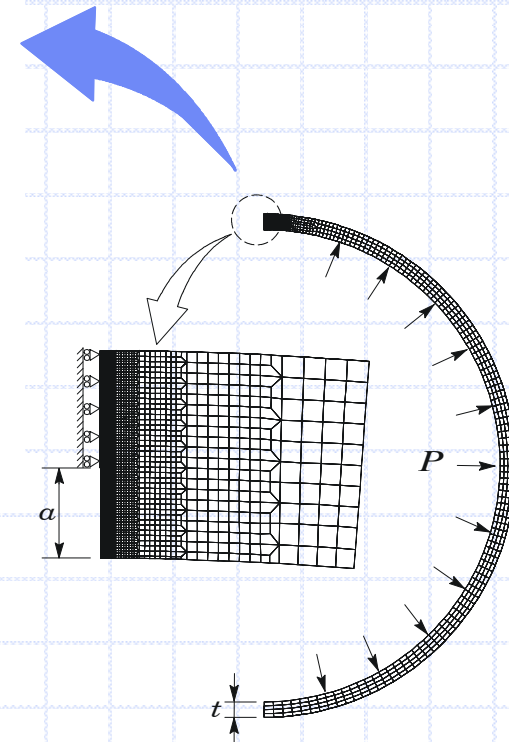
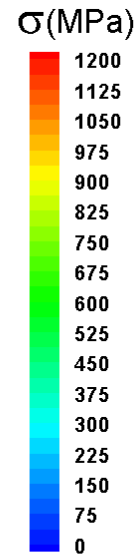
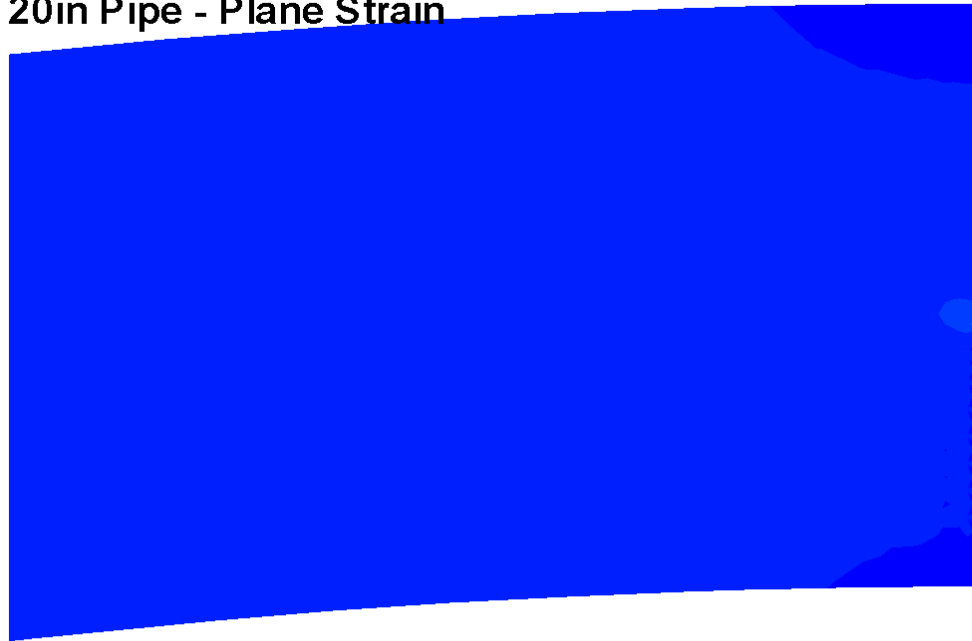
tensão média (hidrostática)

fração volumétrica porosidade

Geometria $a \times 2c$ (mm)	$P_{B-exp}$ (MPa)		Modelo de Células $P_{B-pred}$ (MPa)	
	Trinca Interna	Trinca Externa	Trinca Interna	Trinca Externa
3 × 60	33.0	31.5	38.3	37.6
7 × 140	27.5	25.0	27.3	26.5
10 × 200	22.0	21.0	18.8	17.6

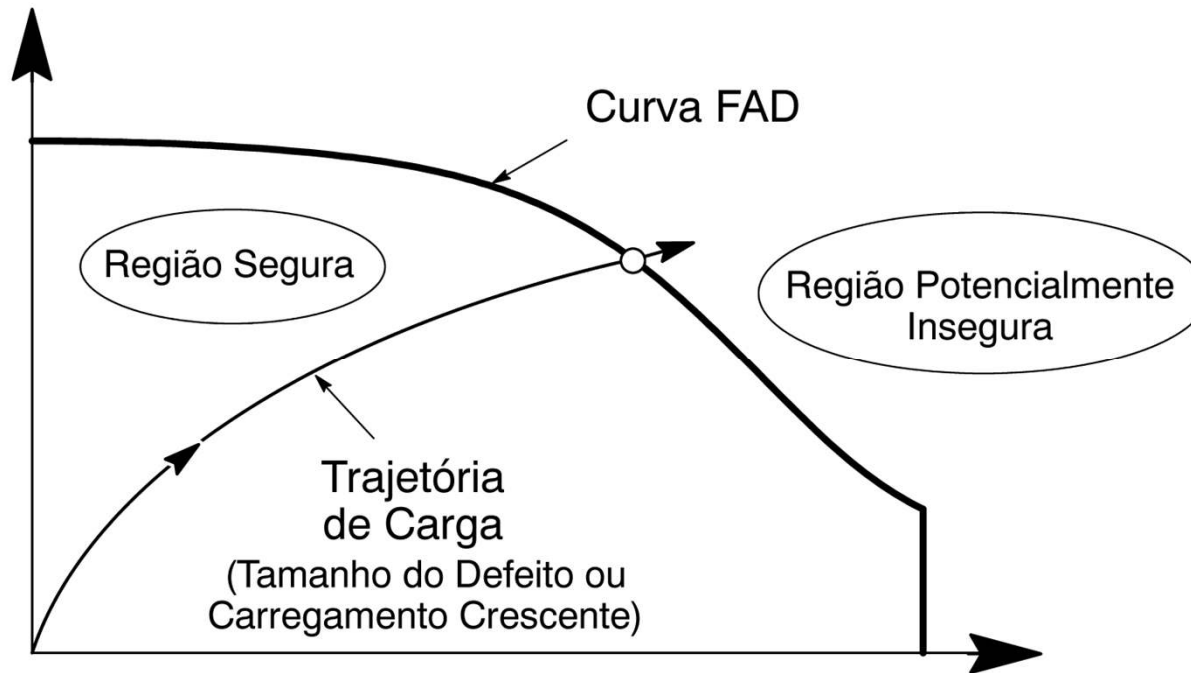
# Efeito de *Bulging*

API 5L - X60  
20in Pipe - Plane Strain



# BS 7910 L2

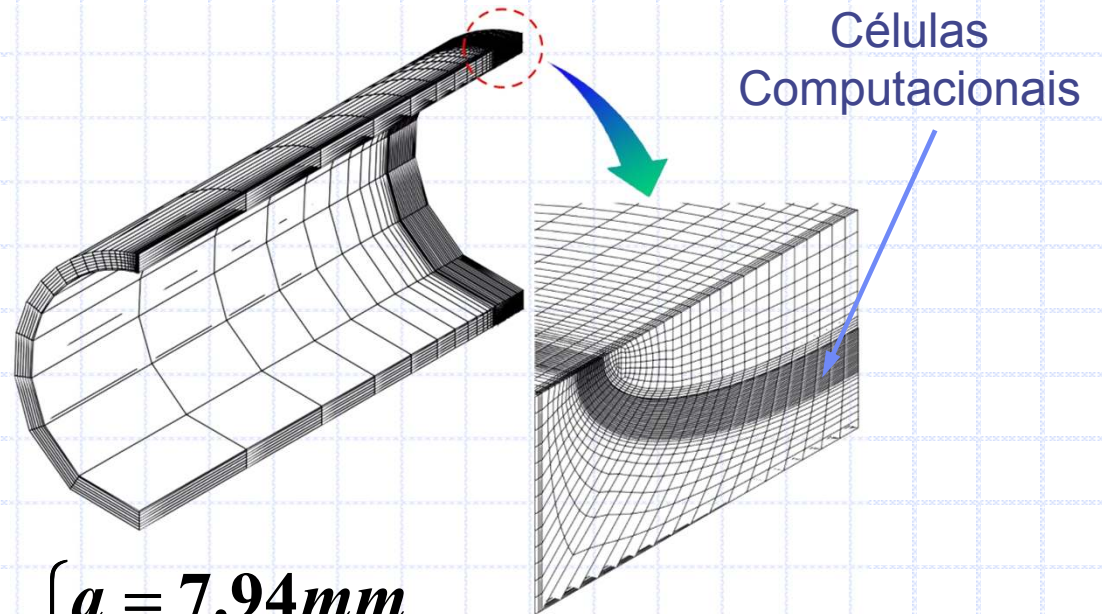
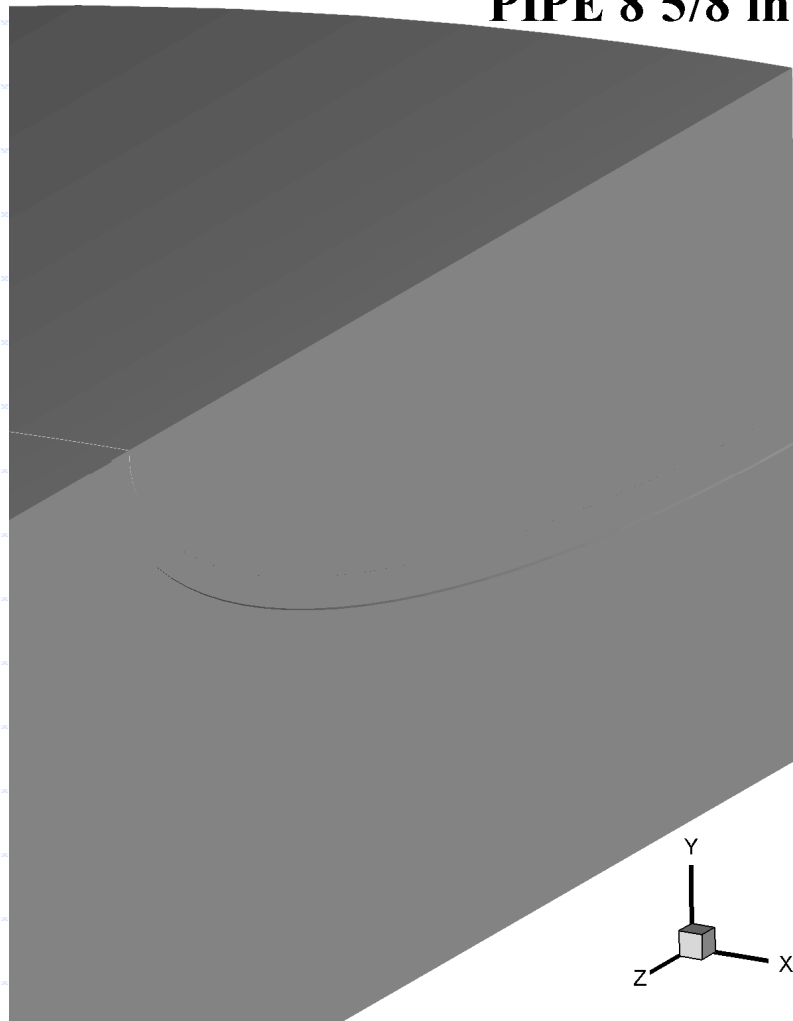
$$K_r = K_I / K_{mat} = \sqrt{J / J_{mat}}$$



$$L_r = \sigma_{ref} / \sigma_{ys}$$

# Aplicação 3D em Espécimes X70

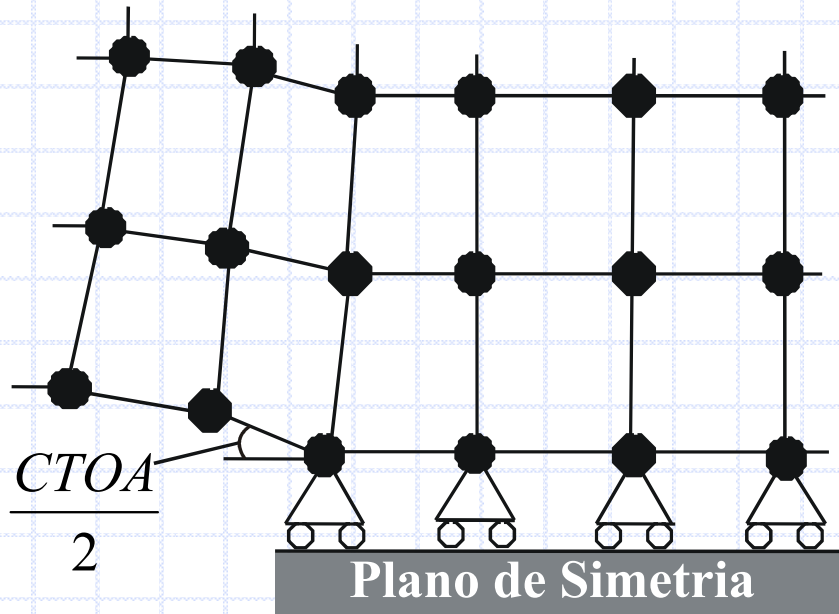
API 5L - X70  
PIPE 8 5/8 in



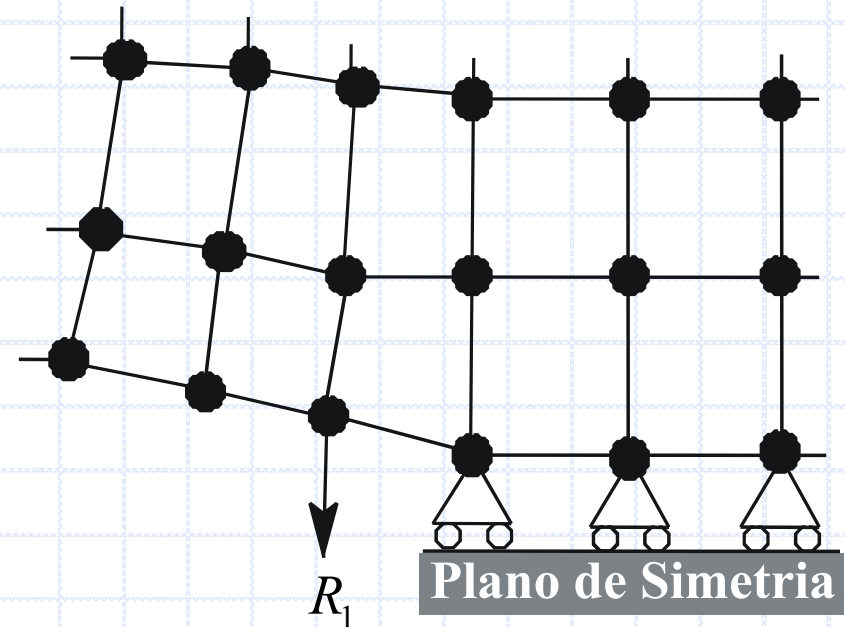
$$\begin{cases} a = 7.94mm \\ 2c = 28.35mm \end{cases}$$

	P (MPa)	$\Delta a$ (mm)
Experimental	83	n.d.
Previsão	82.5	2.2

# Critério CTOA



Antes da Liberação Nodal

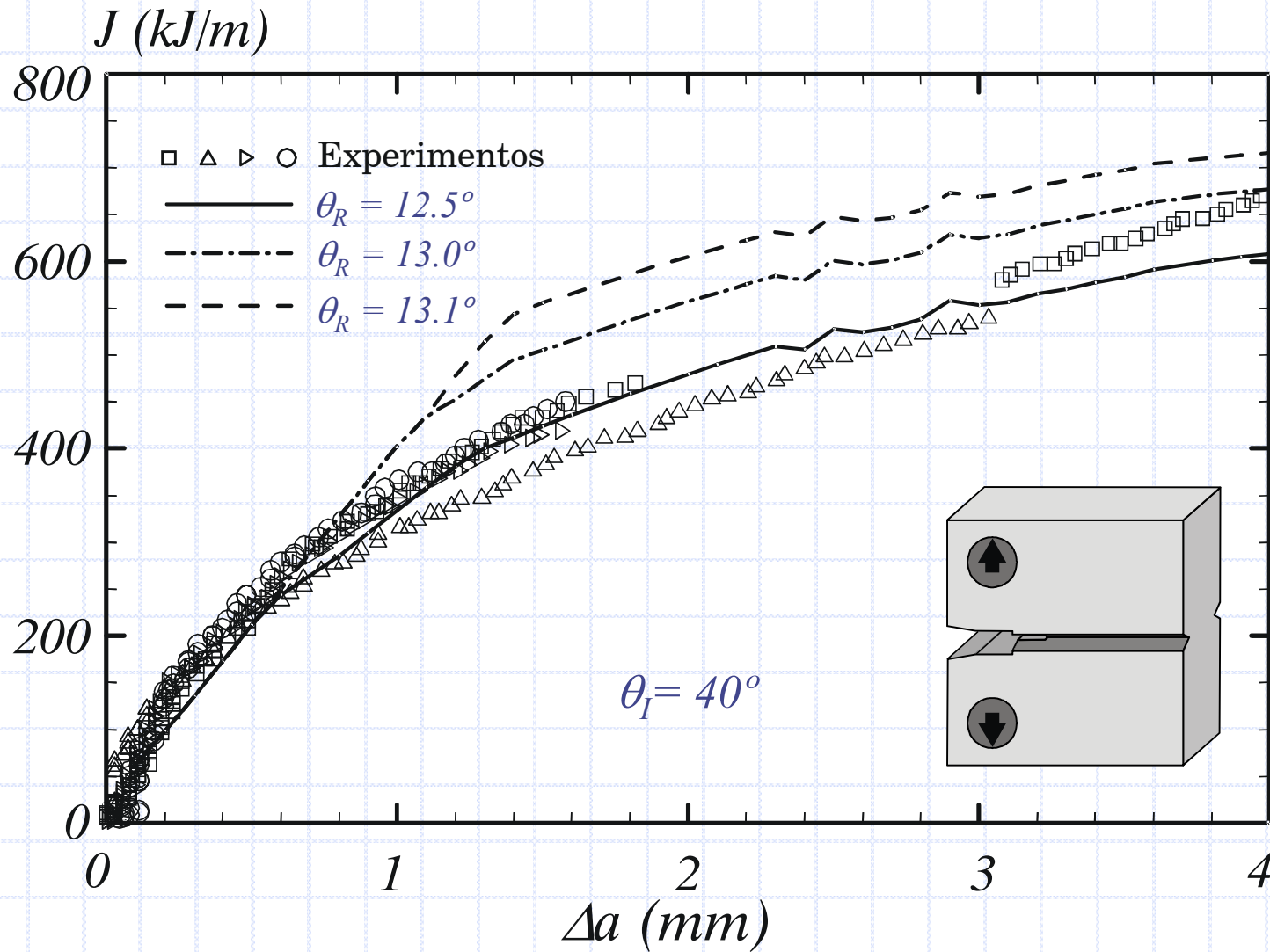


Após a Liberação Nodal

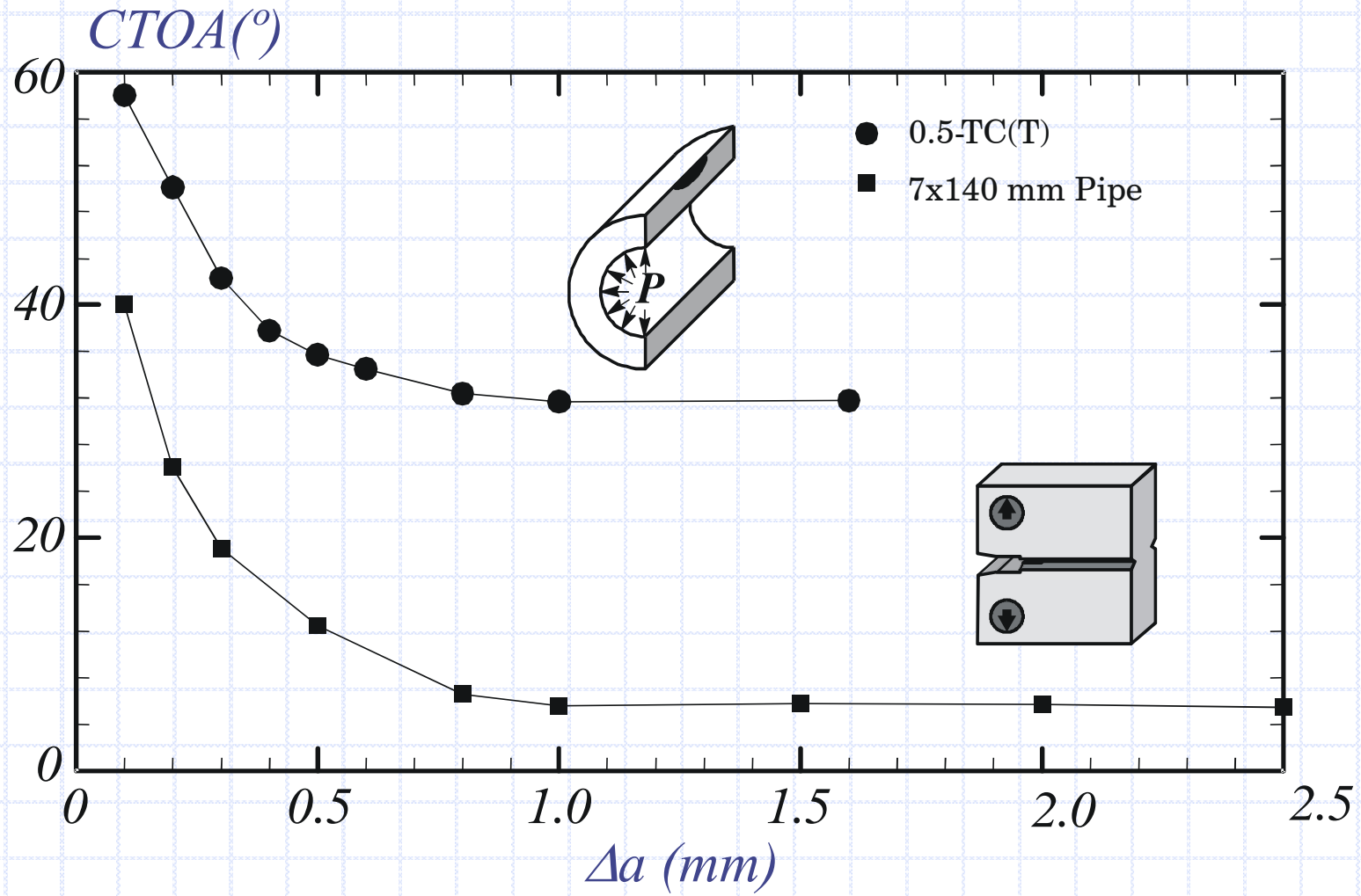
- Propagação da Trinca Definida pelo CTOA Crítico
- Após Transiente Inicial, CTOA Constante Controla a Propagação da Trinca



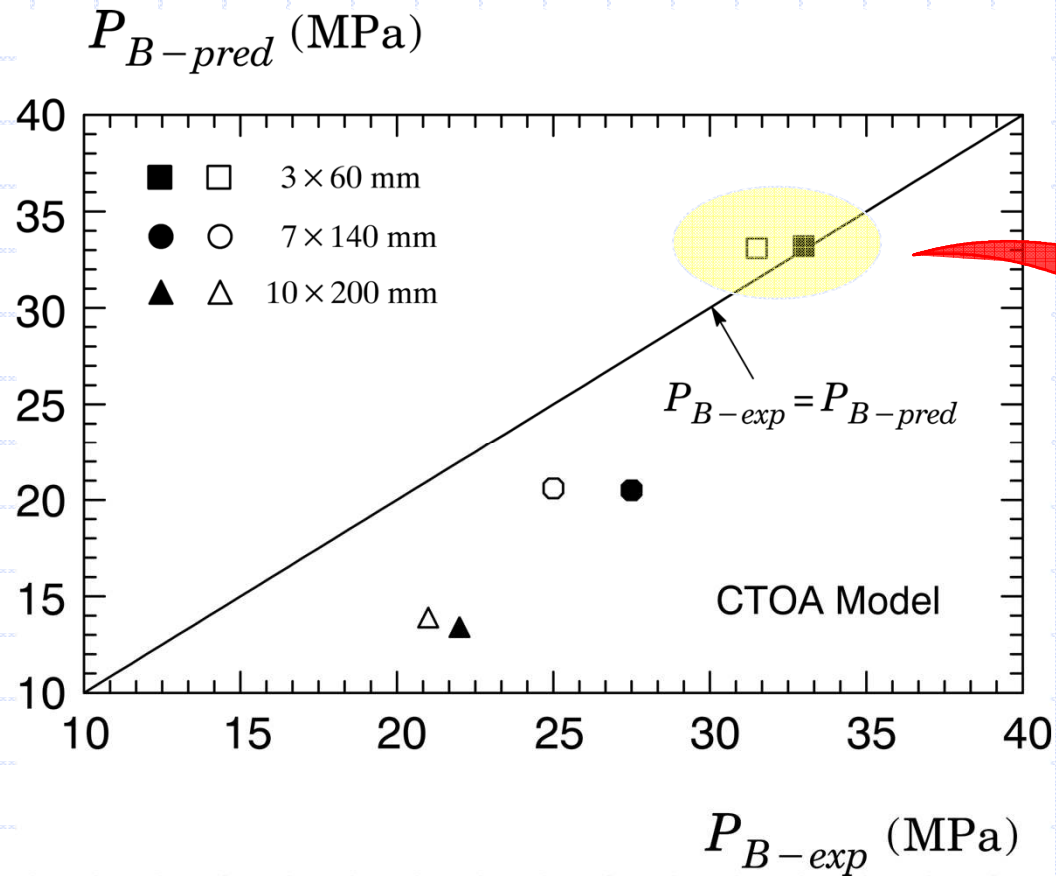
# Calibração do CTOA



# Evolução do CTOA vs. $\Delta a$



# Previsões da Pressão de Ruptura



**Resposta mais Adequada para Defeitos Rasos**

# Escopo

- *O Problema de Falhas Estruturais em Componentes Críticos Revisitado*
- *Metodologias Correntes Baseadas em Mecânica do Contínuo para Avaliação de Defeitos em Componentes Estruturais*
- *Limitações, Aplicabilidades e Aspectos Multidisciplinares*
- ***Desenvolvimento e Aplicação de Modelos Micromecânicos (Local Approaches)***

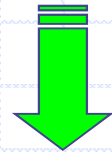
# **Modelo Micromecânico para Fratura em Regime Frágil**



# Fratura Frágil e a Tensão de Weibull

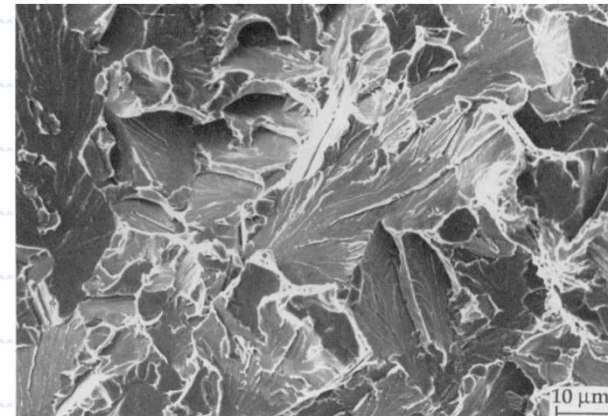
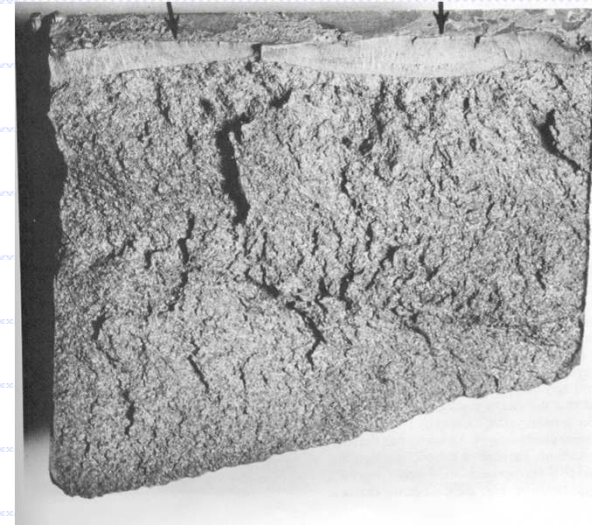
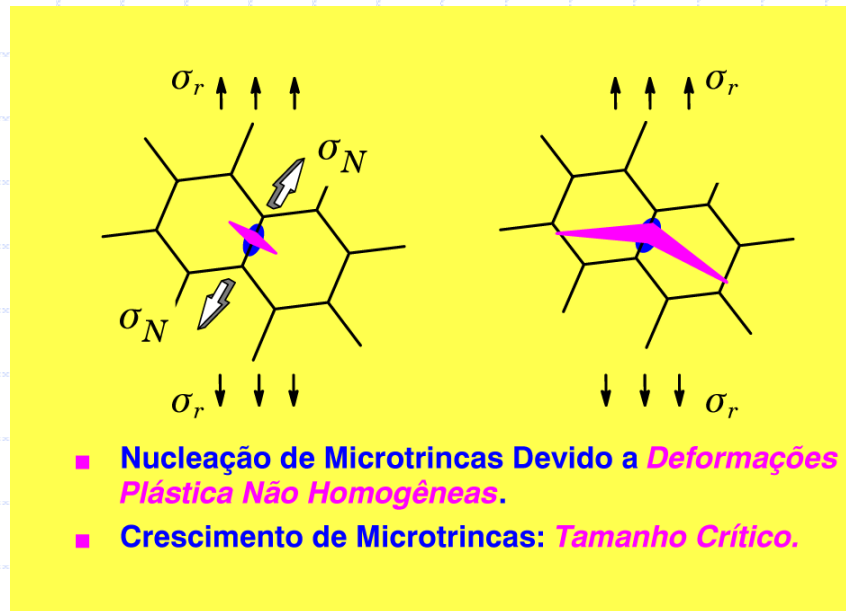
- **1974**→ *Abordagem Inicial do Tratamento Local da Fratura Frágil em Materiais Cerâmicos Utilizando Estatística de Microdefeitos Proposta por Batdorf & Crose*
- **1983**→ *Grupo Beremin (França) Introduziu as Bases de um Modelo Local de Fratura Frágil (**Beremin Model**)*
- **1990**→ *Minami et al. Estenderam o Modelo de Beremin e o Conceito de Tensão de Weibull em Regime Elasto-Pástico*
- **1996**→ *Ruggieri & Dodds Introduziram um Modelo Correlativo Baseado na Tensão de Weibull (**Toughness Scaling Model**)*
- **1998**→ *Gao & Ruggieri & Dodds Propuseram uma Nova Estratégia de Calibração do **TSM** (Efeitos Geométricos sobre  $J_c$ )*
- **2009**→ *Ruggieri Estendeu o Modelo de Beremin e o Conceito de Tensão de Weibull em Regime Elasto-Pástico para Juntas Soldadas*

# Características Macroscópicas



- ***Deformação Plástica (Macroscópica) Ausente ou Limitada***
- ***Ocorre sob Tensões Inferiores ao Regime de Escoamento Generalizado***
- ***Propagação Instável sob Velocidade Elevadas (2000 m/s)***

# Aspectos Fenomenológicos



**Descrição Mecânica do Fenômeno Dominante**

# Distribuição Estatística de Tenacidade

## ■ Distribuição Triparamétrica de Weibull:

$$F(J_c) = 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{J_c - J_{\min}}{J_0 - J_{\min}} \right]^\alpha \right]$$

Módulo de Weibull

Tenacidade Característica  
( $F(J_c) = 63.2\%$ )

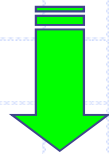
Tenacidade Limite

$J_c \geq J_{\min}$

## ■ Distribuição Biparamétrica de Weibull:

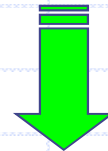
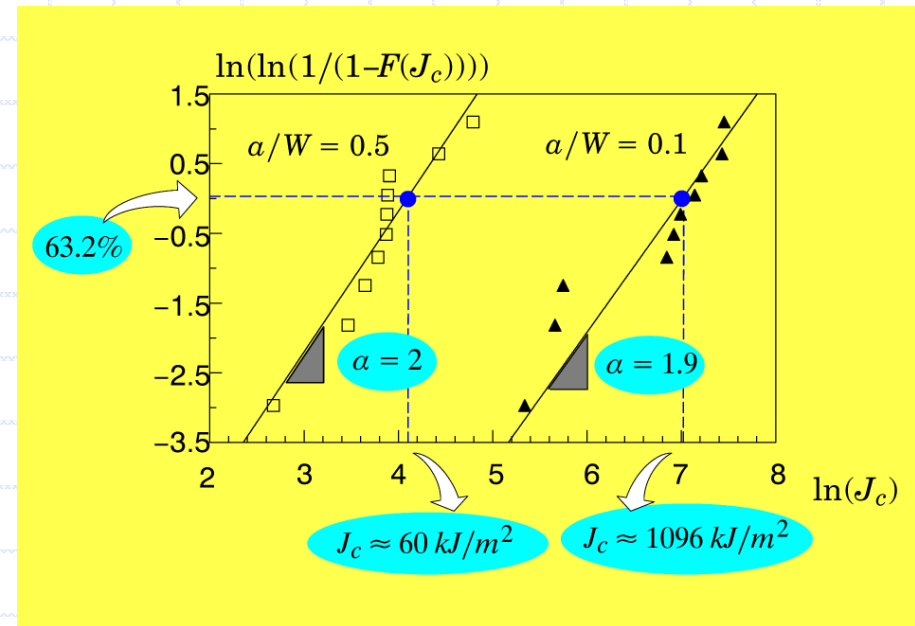
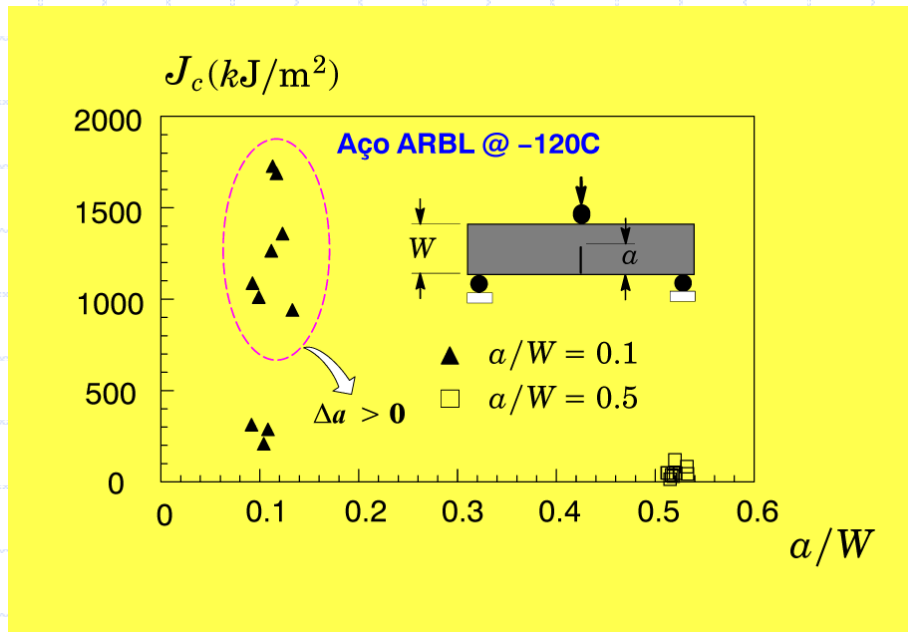
$$F(J_c) = 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{J_c}{J_0} \right]^\alpha \right]$$

$J_c \geq 0$



**Descrição Razoável para Campos de Tensões Uniformes**

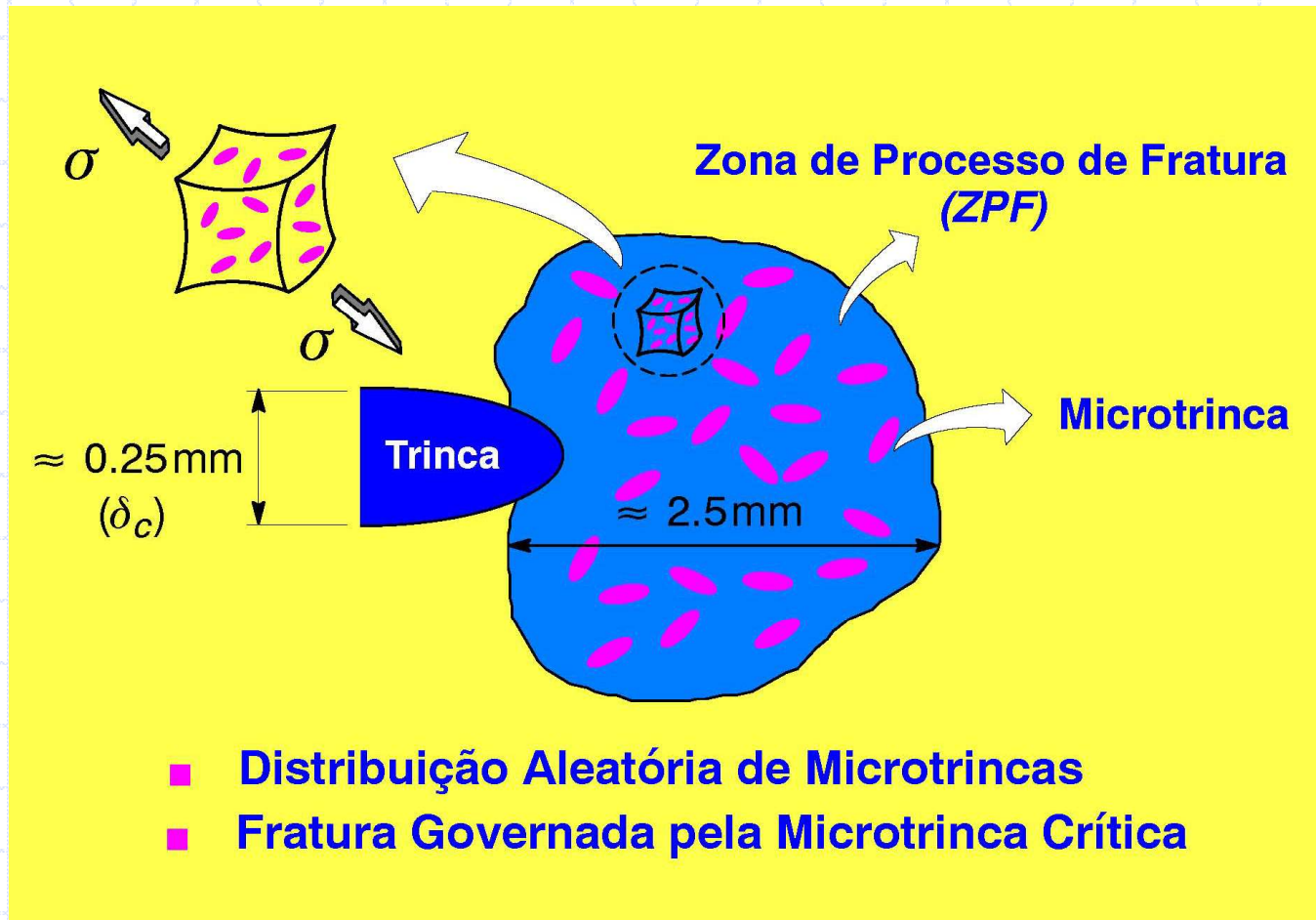
# Distribuição Estatística de Tenacidade



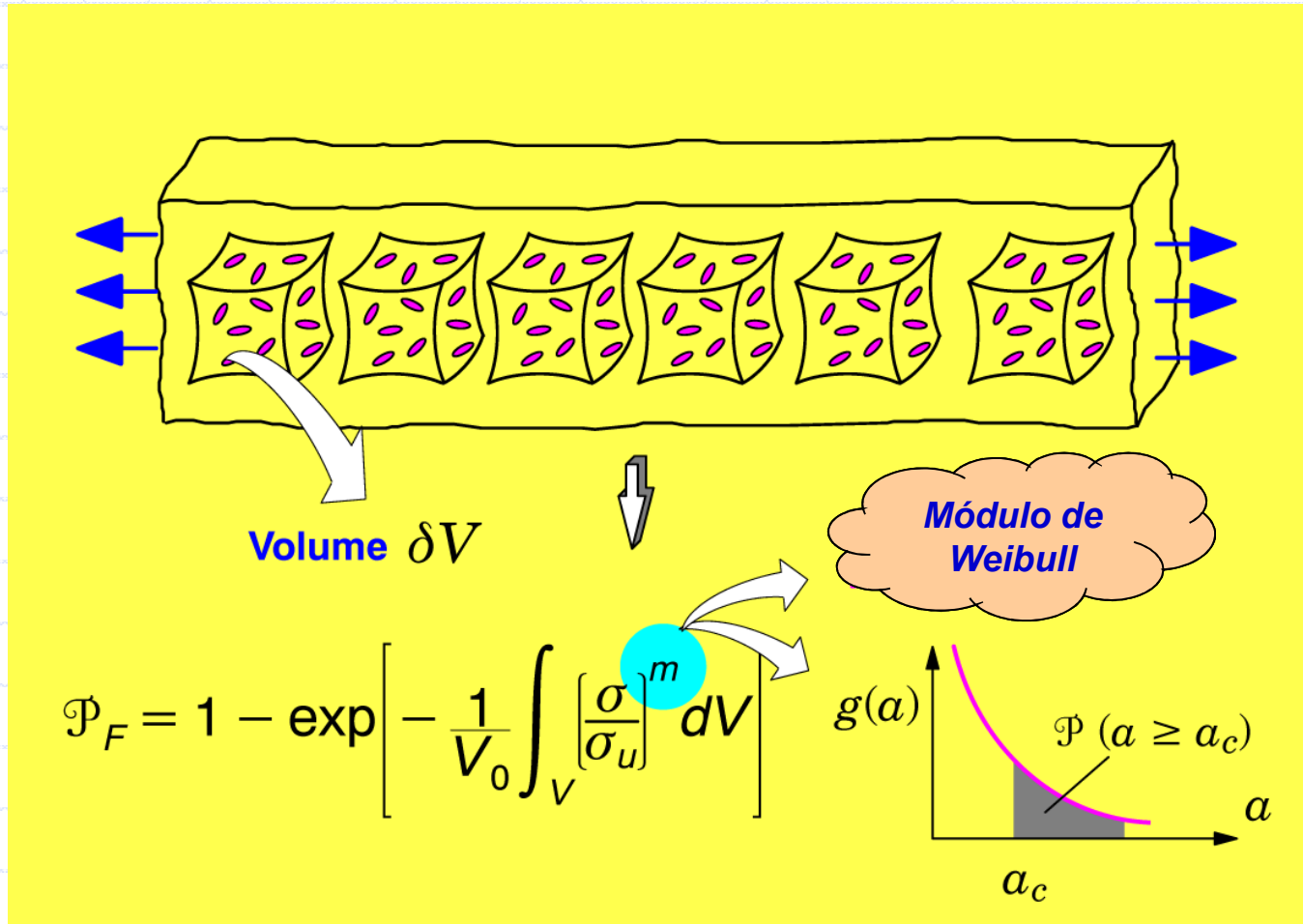
$\alpha = 2$  (Módulo de Weibull) em Regime de Tensões *HRR*



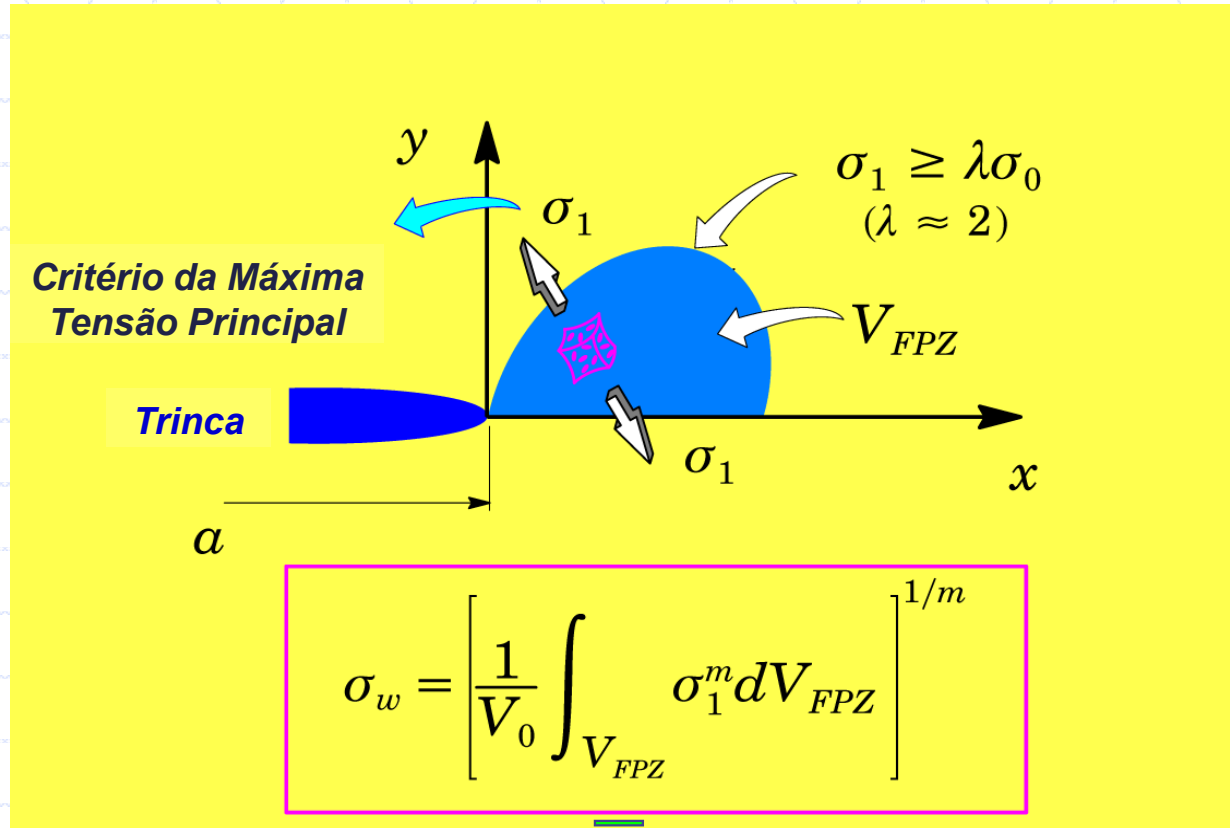
# Abordagem Micromecânica



# Distribuição Limite da Tensão de Fratura



# Tensão de Weibull



**Força Motriz da Trinca**

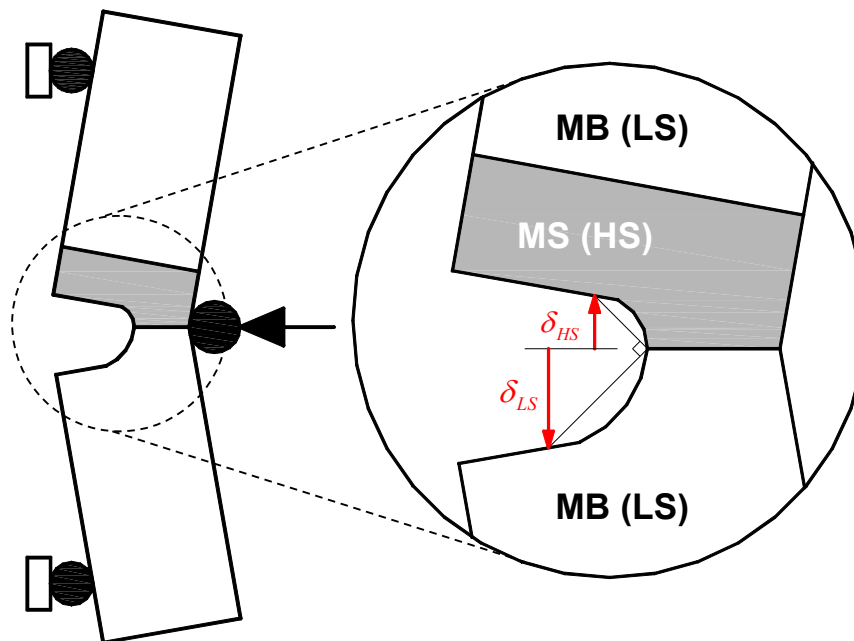
# Modelo Local e a Tensão de Weibull

- **Utiliza Critérios Locais que Descrevem o Micromecanismo (Operativo) de Falha:**  
*Acoplamento do Macroregime e Microregime*
- **Incorporação Simples e Direta de Efeitos e Condições Diversas (MEF):**  
*Estático, Dinâmico, Térmico, 2D, 3D, etc.*
- **Parâmetros de Weibull Independente de Geometria / Triaxialidade de Tensões**  
*Temperatura (?)*  
*Taxa de Deformação (Strain Rate) (?)*  
*Dissimilaridade Mecânica (?)*

# Dissimilaridade Mecânica

(*Weld Strength Mismatch*)

- Dissimilaridade Mecânica entre o Metal de Solda e o Metal Base Altera a Relação Entre a Carga Global (*Macroregime*) as Condições na Ponta da Trinca (*Microregime*)



$$M_L = \frac{\sigma_{YS}^{MS}}{\sigma_{YS}^{MB}}$$



# Evolução dos Campos de Tensões

$M_L=0.6$

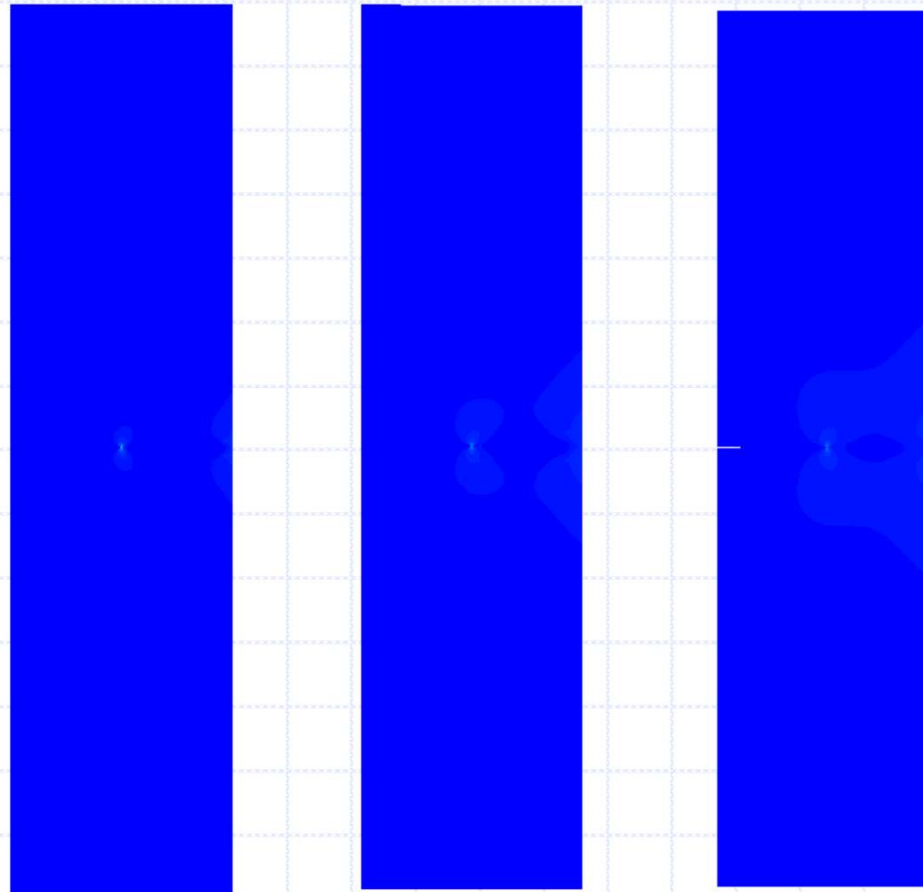
$M_L=1.2$

$M_L=2$

SE(B)

$a/W=0.5$

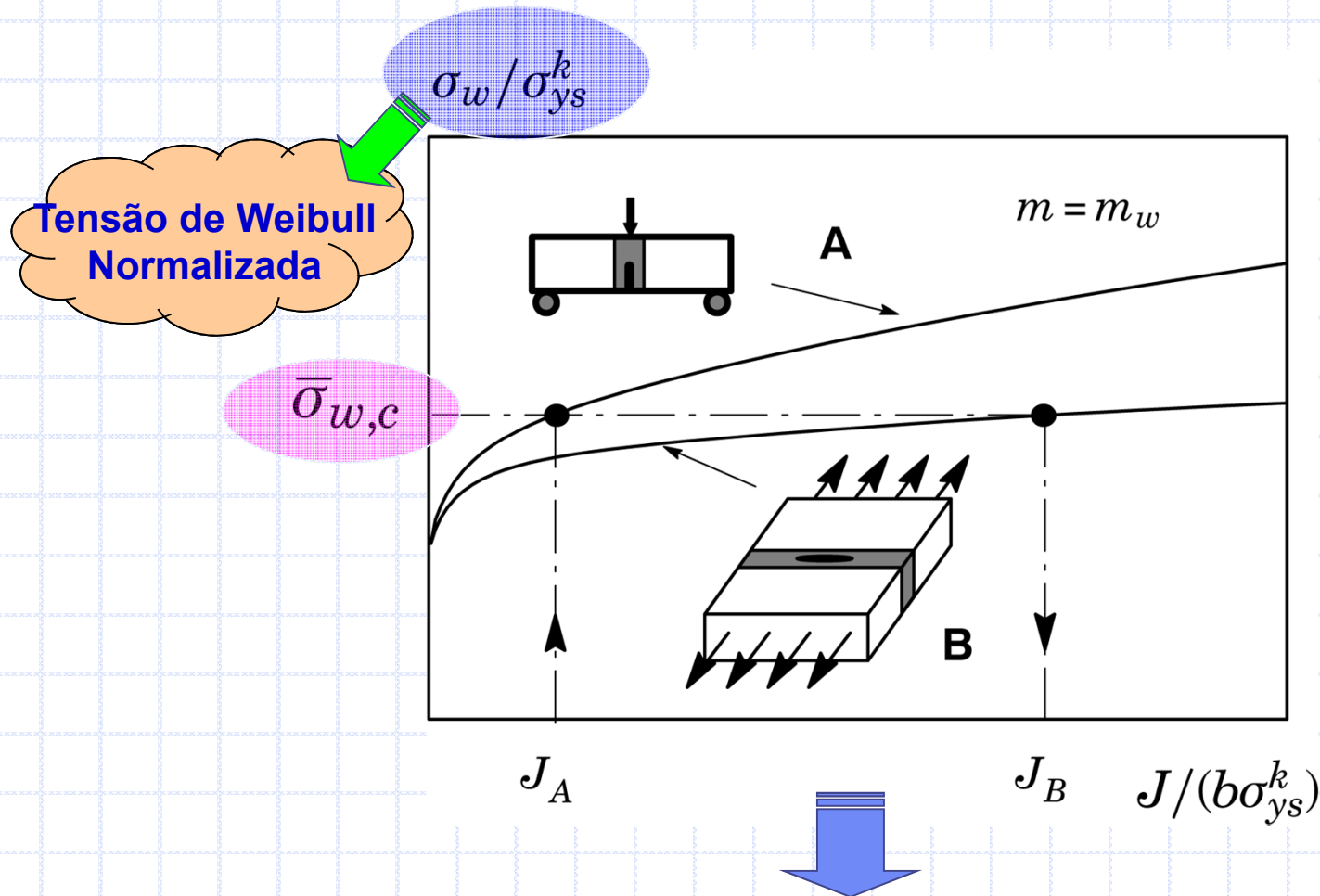
$h=10\text{mm}$



$\sigma_1 \geq 2,5 \cdot \sigma_{YS}$

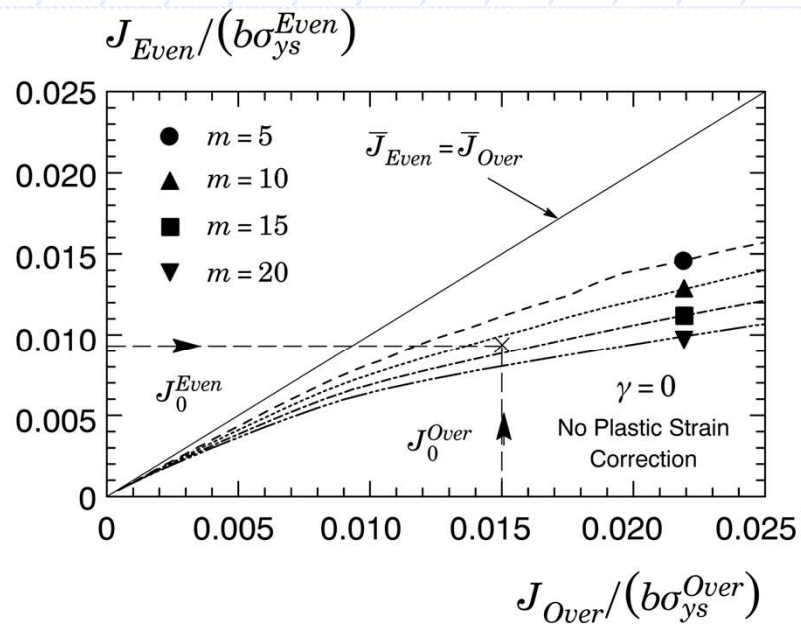
$\frac{J}{b \cdot \sigma_0} = cte / step$

# Modelo Correlativo Modificado



**Tensão de Weibull Normalizada → Força Motriz de Trinca**

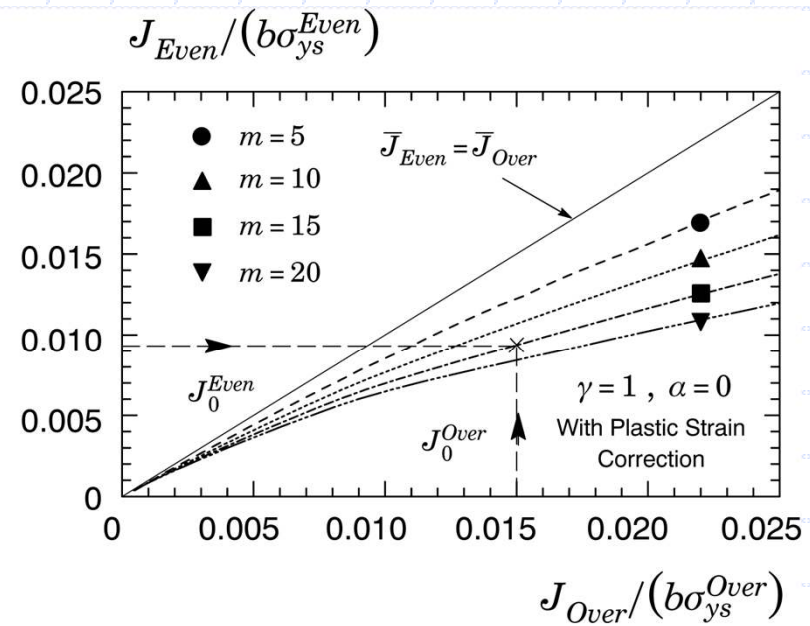
# Calibração do Parâmetro de Weibull $m$



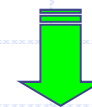
(a)



$m = 13.5$



(b)

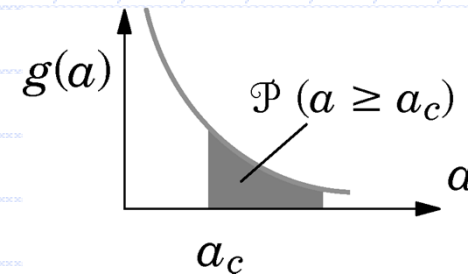


$m = 15$

# Efeitos de Deformação Plástica

- Deformação Plástica Afeta a Densidade de Defeitos

$$g(a) = \epsilon_p^{\gamma(1+\beta)} \left[ \frac{k_0}{a} \right]^{\xi}$$



- Forma Generalizada da Tensão de Weibull

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{\Omega_0} \int_{\Omega} \epsilon_p^{\gamma(1+\beta)} \sigma_1^m d\Omega \right]^{1/m}$$

$$\gamma = 0$$

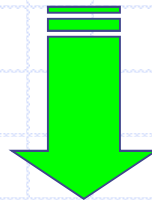
Sem Correção

$$\gamma = 1, \beta = 0$$

Correção Linear

# Aplicação

- ***Ensaaios Mecânicos e de Tenacidade em uma Junta Soldada de um Aço API 5L X80***
- ***Ensaaios de Tenacidade Conduzidos Sobre Espécimes com Diferentes Configurações***
- ***Calibração Paramétrica do Modelo***



***Previsão da Deformação de Falha em Placas  
Tipifica Defeitos Circunferenciais em Dutos (Field Girth Weld)***

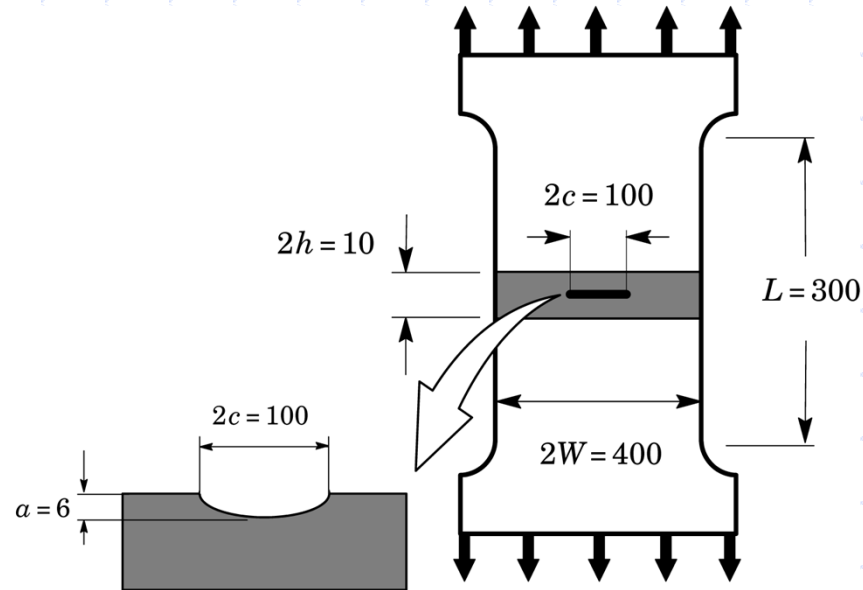
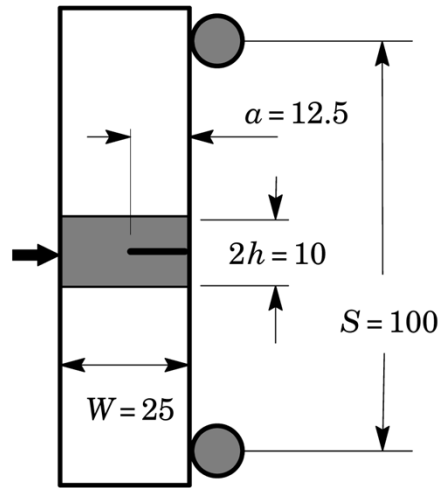


# Soldagem em Campo de Dutos



# Espécimes Testados (Aço API X80)

**SE(B)**  
 $a/W=0.5$



**M(T)**  
 $a/B=0.25$

$$M_L = \frac{\sigma_{YS}^{WM}}{\sigma_{YS}^{BM}}$$

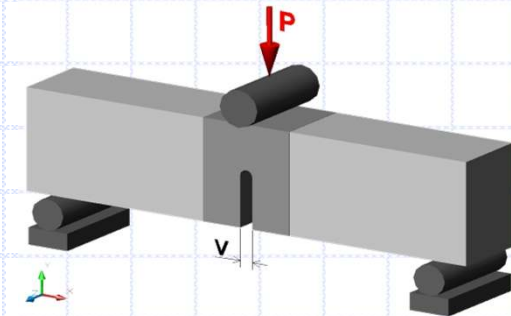
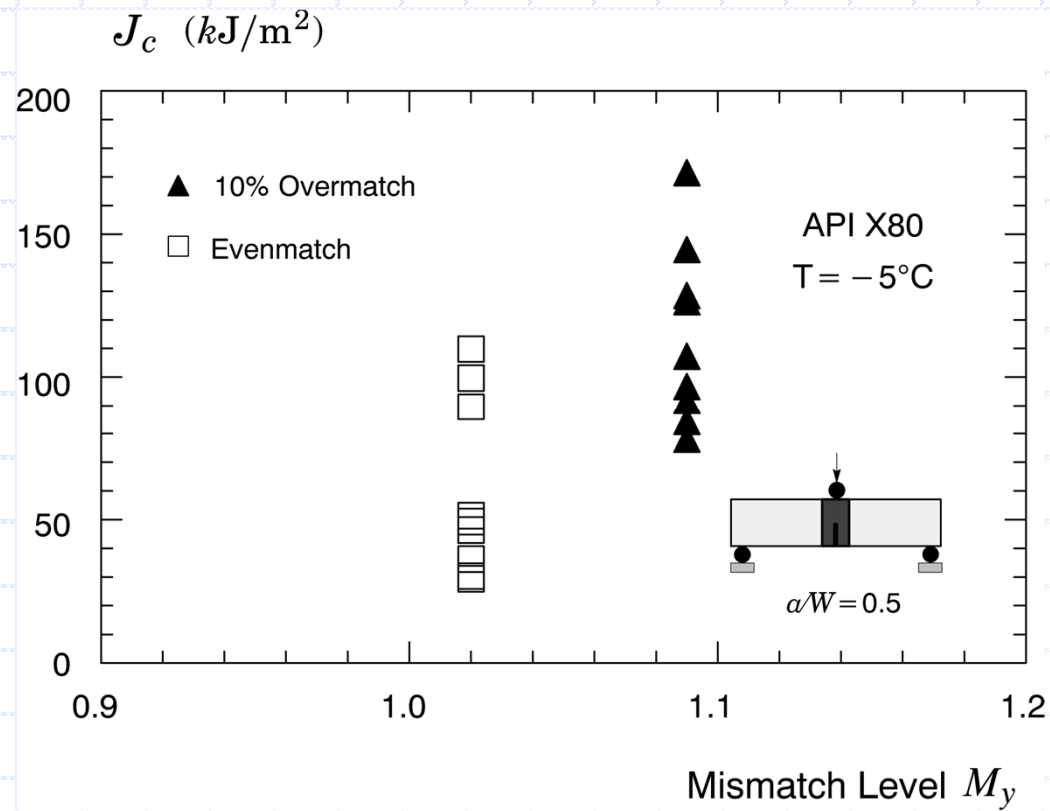


$$\sigma_{YS}^{MB} = 581 MPa$$

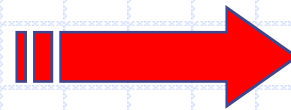
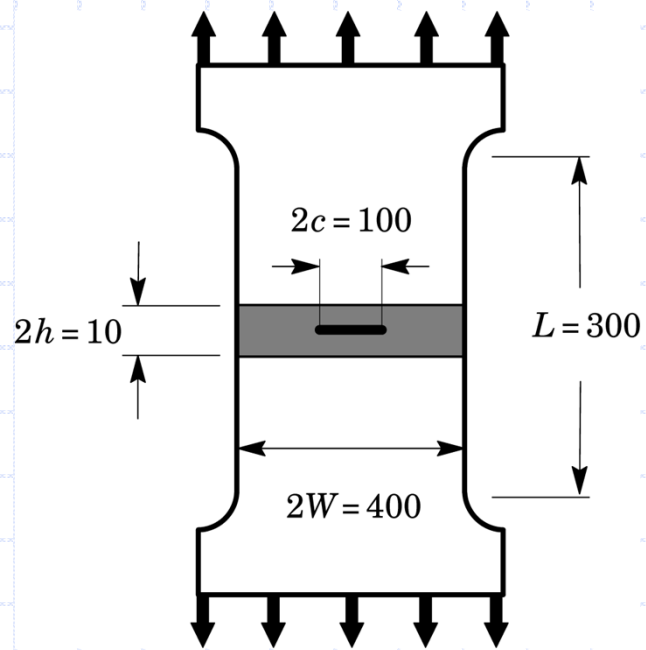


$$M_L = 1.0 / 1.1$$

# Valores Experimentais de Tenacidade

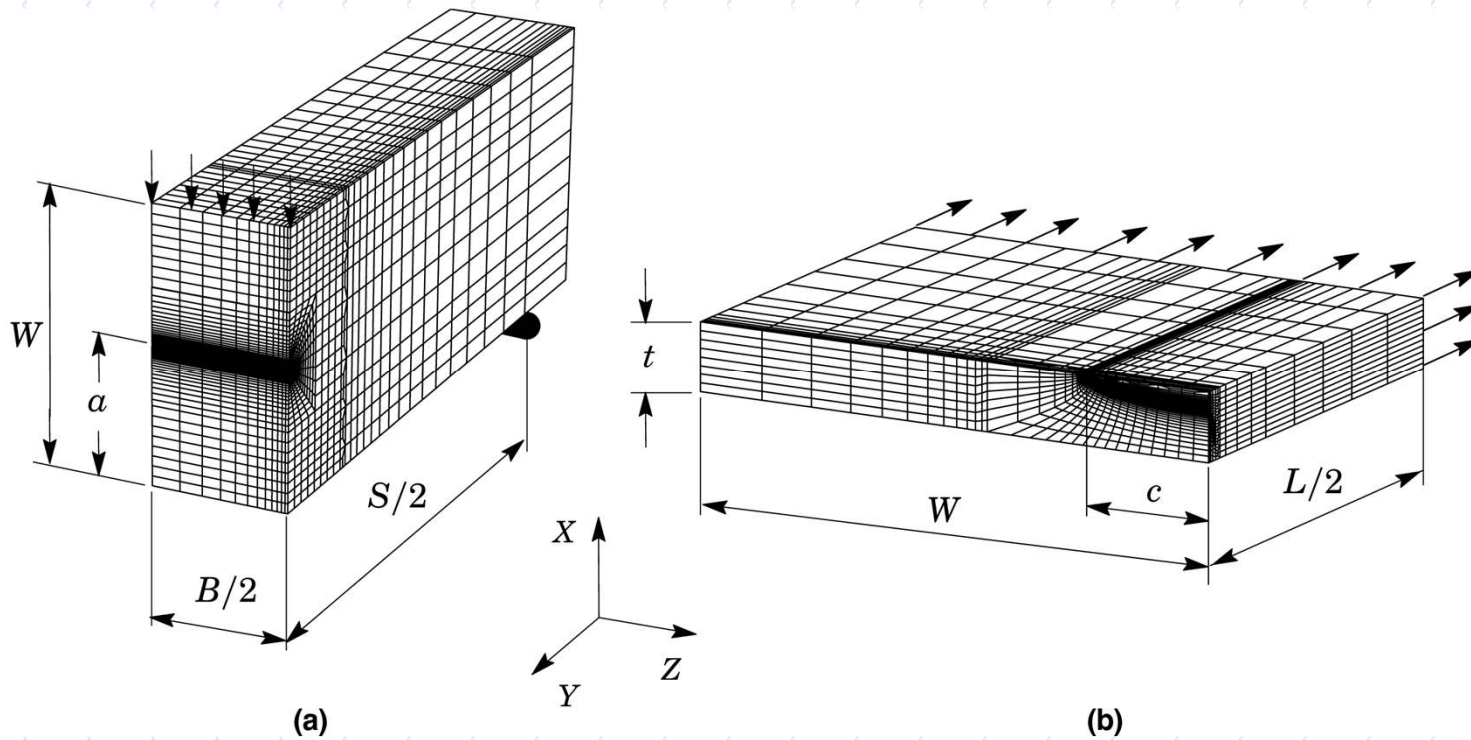


# Deformação de Ruptura M(T)



$$\epsilon_{\text{exp}} = 2.25\%$$

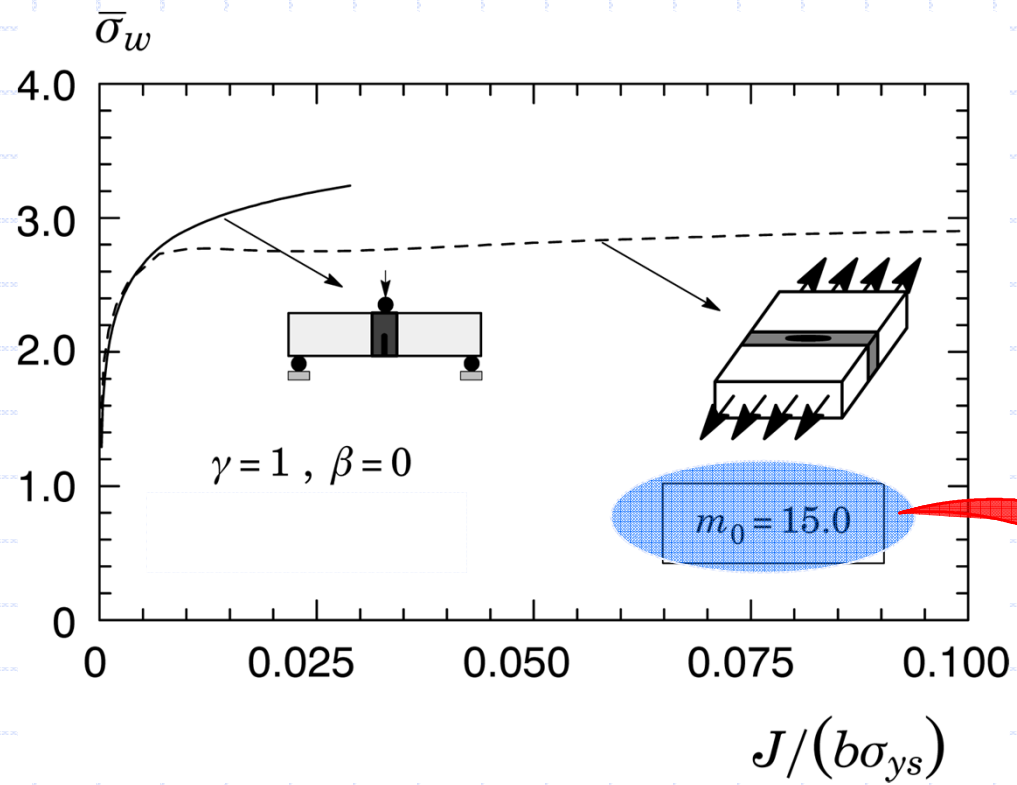
# Modelos de Elementos Finitos



- 12000 nós
- 10000 elementos
- 4h CPU (SGI)

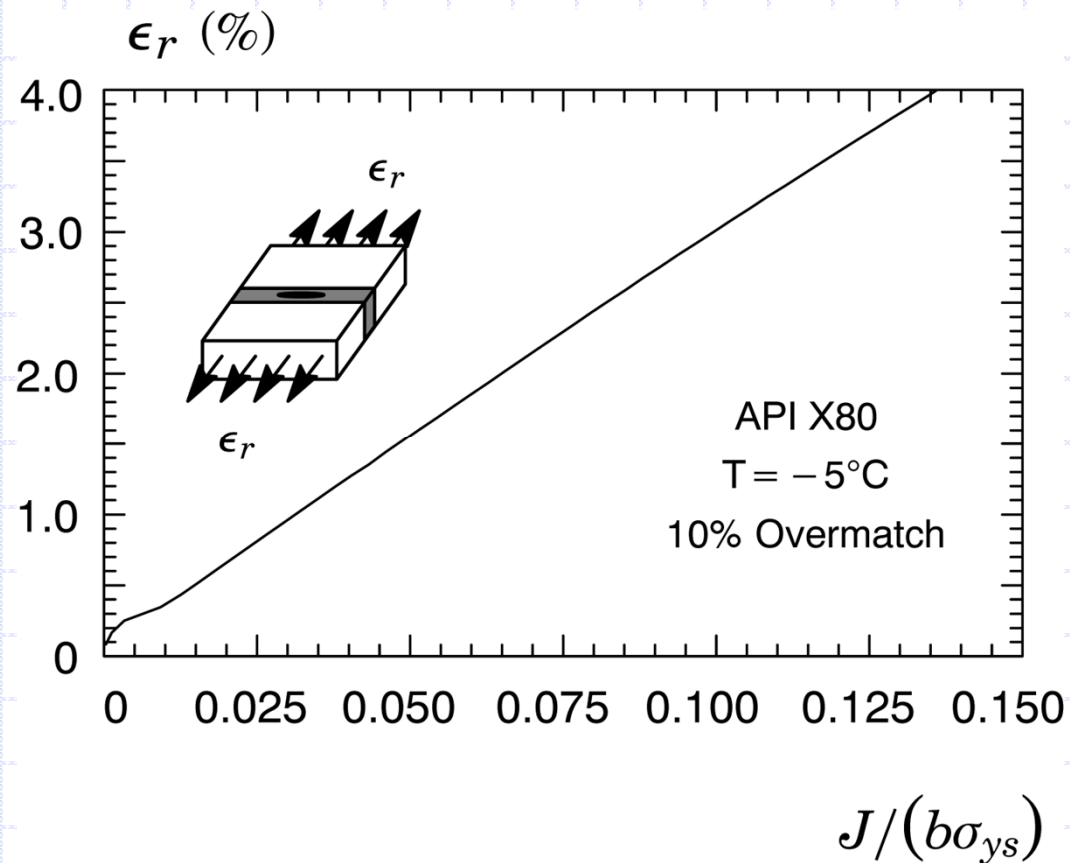


# Modelo Correlativo



**Módulo de Weibull Calibrado**

# Resposta Mecânica do Espécime M(T)



# Previsão da Deformação de Ruptura

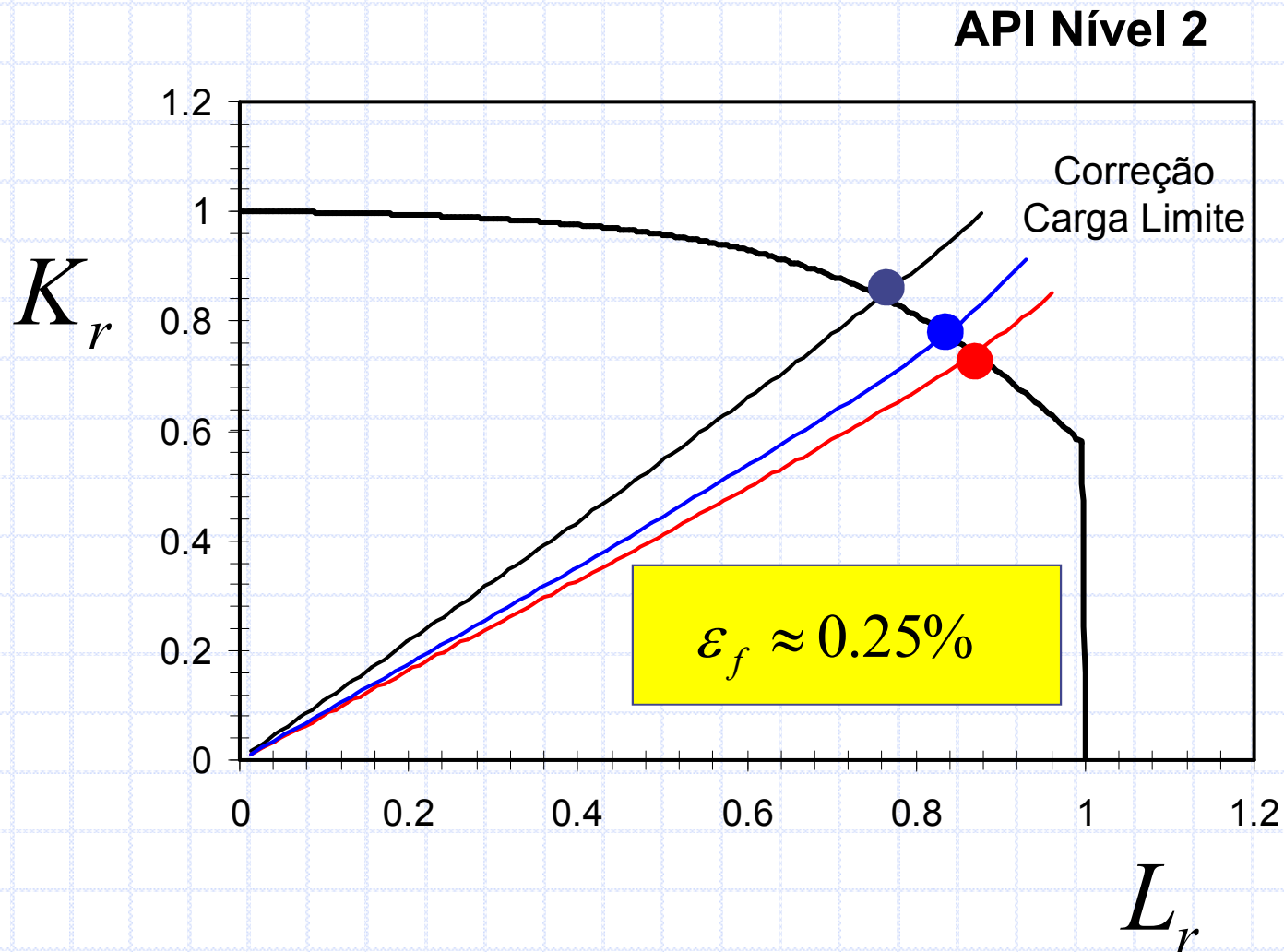
$\epsilon_f$	$\epsilon_{pred}$	Intervalo 90%	$\epsilon_{pred} / \epsilon_f$
0.0225	0.0227	(0.012 , 0.036)	1.01



**Excelente Concordância  
Apesar das Diferenças  
Enormes em  
Comportamento à Fratura**

# Avaliação de Defeitos: API 579

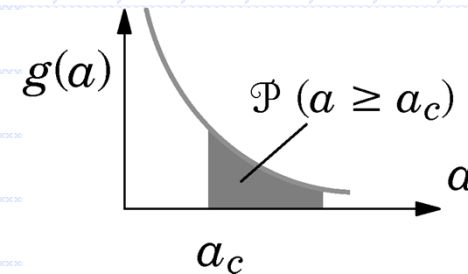
(Donato & Ruggieri, IPC 2008)



# Efeitos de Deformação Plástica

- Deformação Plástica Afeta a Densidade de Defeitos

$$g(a) = \epsilon_p^{\gamma(1+\beta)} \left[ \frac{k_0}{a} \right]^{\xi}$$



- Forma Generalizada da Tensão de Weibull

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{\Omega_0} \int_{\Omega} \epsilon_p^{\gamma(1+\beta)} \sigma_1^m d\Omega \right]^{1/m}$$

$$\gamma = 0$$

Sem Correção

$$\gamma = 1, \beta = 0$$

Correção Linear