

Relatório Final de Projeto

Seu Nome

November 11, 2025

Contents

1	Ingeral J	2
---	-----------	---

Chapter 1

Integral J

...

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dy - \mathbf{T} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds \right)$$

Onde cada termo significa: Γ (Gamma): É o caminho (contorno) de integração, percorrido no sentido anti-horário, que começa na face inferior da trinca, envolve a ponta da trinca e termina na face superior. W (Strain Energy Density): A densidade da energia de deformação. $W = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$ Esta é a área sob a curva tensão-deformação do material. dy : Um incremento infinitesimal do caminho Γ na direção y (perpendicular à trinca). \mathbf{T} (Vetor Tração): O vetor tração atuando sobre o caminho Γ . $\mathbf{T} = \sigma \cdot \mathbf{n}$ Onde σ é o tensor de tensões e \mathbf{n} é o vetor normal unitário e externo ao caminho Γ . \mathbf{u} (Vetor Deslocamento): O vetor deslocamento. $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x}$: O gradiente do vetor deslocamento em relação à direção de propagação da trinca (eixo x). ds : Um incremento infinitesimal do comprimento do arco ao longo do caminho Γ . A propriedade mais importante da integral J é sua independência do caminho: desde que o caminho Γ comece e termine nas faces da trinca (que estão livres de tensão) e envolva a ponta da trinca, o valor de J será o mesmo, não importa o quão perto ou longe da ponta o caminho é desenhado. — 2 Métodos Práticos de Cálculo Embora a definição matemática seja uma integral de linha, resolvê-la analiticamente é quase impossível para geometrias reais. Na prática, usamos dois métodos principais: A. Método dos Elementos Finitos (MEF) Este é o método mais comum e robusto, usado em softwares como Abaqus, ANSYS, e outros (e provavelmente o que você usaria no seu próprio software FEM). Os softwares de MEF não costumam calcular a integral de linha diretamente no contorno (pois isso é muito sensível à qualidade da malha perto da ponta da trinca). Em vez disso, eles usam uma técnica muito mais poderosa chamada Integral de Domínio (Domain Integral

Method). O que é: Usando o teorema da divergência de Gauss, a integral de linha (1D) que define J é convertida em uma integral de área (2D) ou de volume (3D) sobre um "domínio" de elementos ao redor da ponta da trinca. Por que é melhor: 1. Menos Sensível à Malha: A integral é calculada sobre um volume de elementos, suavizando erros de um único elemento. O resultado é muito mais estável e preciso. 2. Independência do Caminho: O software calcula J para vários anéis (domínios) concêntricos de elementos e verifica se o valor é constante, confirmando a validade do cálculo. 3. Base Teórica: A integral de domínio é baseada no conceito de Extensão Virtual da Trinca (VCE), que calcula a mudança na energia potencial do sistema (U) para um pequeno avanço virtual da trinca (da). A relação é $J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da}$ (onde B é a espessura). 4. Em resumo (no MEF): Você modela sua peça, define a trinca, e solicita ao solver para calcular a integral J . O solver usa o método da integral de domínio para obter um valor numérico preciso com base nos campos de tensão, deformação e deslocamento calculados em sua simulação. B. Métodos de "Handbook" (Para Geometrias Padrão) Para ensaios de laboratório com corpos de prova padronizados (como Compact Tension - CT, ou Single Edge Notch Bending - SENB), existem fórmulas empíricas (baseadas em extensas análises de MEF e experimentos) que calculam J a partir da curva Carga vs. Deslocamento (P-u). Nesses casos, J é tipicamente separado em suas componentes elástica e plástica:

$$J = J_{el} + J_{pl}$$

1. Componente Elástica (J_{el}): É calculada usando o Fator de Intensidade de Tensão, K_I (da Mecânica da Fratura Linear Elástica). $J_{el} = \frac{K_I^2}{E'}$ Onde $E' = E$ (para estado plano de tensão) ou $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ (para estado plano de deformação). K_I é encontrado em manuais para a geometria específica. "2. Componente Plástica (J_{pl}): É calculada a partir da área plástica (A_{pl}) sob a curva Carga-Deslocamento. $J_{pl} = \frac{\eta_p \cdot A_{pl}}{B \cdot b_0}$ A_{pl} : A área sob a curva P-u que corresponde à deformação plástica. η_p (Eta-factor): Um fator geométrico que depende do tipo de corpo de prova (ex: para um corpo CT, $\eta_p \approx 2$). B : Espessura do corpo de prova. b_0 : O "ligamento" (comprimento restante não trincado). Este método é como a tenacidade à fratura (J_{IC}) é determinada experimentalmente (por exemplo, na norma ASTM E1820). — 3 Quando a Integral J é Usada? A principal aplicação da integral J é como um critério de falha para materiais dúcteis. A fratura é prevista para ocorrer quando o valor da integral J aplicada (J) atinge um valor crítico, que é a tenacidade à fratura do material (J_{IC}). Critério de Fratura: $J \geq J_{IC}$ A integral J também descreve a intensidade dos campos de tensão e deformação na ponta da trinca na região plástica (o "campo HRR"), da mesma forma que K descreve o campo elástico.