

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRATURA E FADIGA  
ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DE TENACIDADE À PARTIR DA MECÂNICA DA FRATURA  
ELASTO-PLÁSTICA

por

LUCAS PAZZA  
PAULO DE SOUZA  
RAFAEL PECANTET

Trabalho avaliativo da disciplina de Introdução  
à Mecânica da Fratura e Fadiga

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Prof. Ignacio

Porto Alegre, Dezembro de 2025

## RESUMO

Este resumo foi elaborado com o auxílio da Inteligência Artificial Gemini Pro da Google e descreve um estudo experimental focado na tenacidade à fratura do aço AISI 4340 com dureza de 34 HRC, visando especificamente avaliar a degradação causada pela fragilização por hidrogênio. Seguindo rigorosamente a norma ASTM E1820 e utilizando o método da compliância elástica em corpos de prova do tipo Single Edge Bend [SE(B)], o estudo comparou o desempenho do material em ambiente inerte (ar) contra ensaios realizados em célula eletrolítica sob permeação de hidrogênio. As análises das curvas  $J$  vs.  $\Delta a$  revelaram que, enquanto o material exibe um comportamento dúctil e estável ao ar, a exposição ao hidrogênio resulta em uma perda drástica de tenacidade, evidenciada por curvas de resistência (Curvas  $R$ ) significativamente mais baixas e planas, indicando uma severa redução na resistência tanto à iniciação quanto à propagação de trincas.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>2</b>
2.1	Mecânica Linear da Fratura . . . . .	2
2.2	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>3</b>
3.1	ASTM E1820 . . . . .	3
3.2	Procedimento de Ensaio . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>4</b>
4.1	Ensaio ao Ar (Linha Azul Escuro) . . . . .	4
4.2	Ensaio com o Meio Agressivo (Linhas Azul Claro e Verde) . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>6</b>

# 1 Introdução

A mecânica da fratura consolidou-se como uma disciplina essencial para mitigar os altos custos e riscos de falhas estruturais, que se tornaram mais críticas com a complexidade tecnológica moderna e são categorizadas desde erros de negligência até fatores imprevistos em novos projetos, como as famosas fraturas nos navios *Liberty* durante a Segunda Guerra Mundial. Historicamente, a transição de estruturas de compressão (tijolos e argamassa) para o aço sob tração na Revolução Industrial exigiu novas teorias, evoluindo do trabalho inicial de Griffith com vidro em 1920 para as adaptações de Irwin para metais, que introduziram o fator de intensidade de tensão ( $K$ ) e a taxa de liberação de energia ( $G$ ). Diferentemente da abordagem tradicional que compara apenas tensão e resistência, a mecânica da fratura fundamenta-se em um triângulo crítico de variáveis — tensão aplicada, tenacidade do material e tamanho da falha —, permitindo o uso de conceitos de tolerância ao dano para prever a vida útil de componentes com trincas subcríticas, abrangendo tanto regimes elásticos lineares quanto elasto-plásticos (Anderson; Anderson, 2005).

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 Mecânica Linear da Fratura

A Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM) é aplicável a materiais que seguem a lei de Hooke, onde a fratura ocorre quando a tensão aplicada é suficiente para romper as ligações atômicas, embora a resistência real seja muito inferior à teórica devido à presença de falhas. Conforme introduzido na seção 2.2 (Anderson; Anderson, 2005), essas falhas atuam como concentradores de tensão; Inglis demonstrou que, para um orifício elíptico, a tensão local aumenta conforme o raio da ponta da falha diminui, sendo descrita pela equação  $\sigma_A = 2\sigma\sqrt{a/\rho}$ . Para trincas extremamente agudas, essa teoria prevê tensões infinitas, criando um paradoxo que motivou Griffith a desenvolver uma teoria de fratura baseada em energia em vez de tensão local.

Na seção 2.4 (Anderson; Anderson, 2005), Irwin expandiu essa abordagem definindo a taxa de liberação de energia ( $\mathcal{G}$ ), que representa a variação da energia potencial em relação à área da trinca e serve como a força motriz para a extensão da fratura. A falha ocorre quando  $\mathcal{G}$  atinge um valor crítico ( $\mathcal{G}_c$ ), correspondente à tenacidade do material. Além da abordagem energética, as condições na ponta da trinca são caracterizadas pelo fator de intensidade de tensão ( $K$ ), que define a amplitude da singularidade da tensão local. A seção 2.7 introduz a conexão entre esses dois parâmetros principais, relacionando a taxa de liberação de energia ( $\mathcal{G}$ ) diretamente ao fator de intensidade de tensão ( $K$ ).

### 2.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

A Mecânica da Fratura Elástica Linear (LEFM) é válida apenas quando a deformação inelástica é confinada a uma pequena região na ponta da trinca, o que a torna inadequada para materiais tenazes que sofrem extensa deformação plástica antes da falha. Para lidar com esses casos onde as premissas lineares são violadas, emprega-se a Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (EPFM), que assume um comportamento material isotrópico, elástico não-linear e independente do tempo, idealizando a deformação plástica como uma elasticidade não-linear reversível.

Para caracterizar a fratura nesses materiais não-lineares, Rice introduziu a Integral  $J$ , que é uma integral de linha independente do caminho avaliada no sentido anti-horário ao redor da ponta da trinca. Conforme descrito no capítulo 3.2 (Anderson; Anderson, 2005), a Integral  $J$  generaliza o conceito de taxa de liberação de energia para materiais não-lineares, sendo que, para o caso específico de um material elástico linear, a Integral  $J$  reduz-se matematicamente e é idêntica à taxa de liberação de energia  $G$  da mecânica linear ( $J = G$ ).

O conceito de curva  $R$  (curva de resistência) surge no contexto do crescimento de trinca controlado por  $J$ , onde materiais dúcteis exibem um rasgamento estável antes da falha instável, significando que a tenacidade do material aumenta com a extensão da trinca. A curva  $J - R$  é construída plotando-se a resistência à fratura ( $J$ ) contra o crescimento dúctil da trinca ( $\Delta a$ ), e seu significado é fundamental para a análise de estabilidade estrutural: o crescimento da trinca é estável enquanto a curva da força motriz aplicada for menor que a curva  $R$  do material, ocorrendo a instabilidade apenas quando a taxa de aumento da força motriz supera a inclinação da curva de resistência.

## 3 Metodologia

### 3.1 ASTM E1820

A norma (ASTM International, 2025) estabelece um método de teste padrão unificado para a determinação da tenacidade à fratura de materiais metálicos, utilizando parâmetros da mecânica da fratura como o Fator de Intensidade de Tensão ( $K$ ), a Integral  $J$  e o Deslocamento de Abertura da Ponta da Trinca ( $\delta$ ). Ela serve para caracterizar tanto a tenacidade à fratura em situações de instabilidade (fratura frágil ou clivagem) quanto a resistência ao crescimento estável da trinca (rascamento dúctil), consolidando procedimentos que anteriormente eram normas separadas em um único método abrangente. Seu escopo cobre a realização de ensaios quase-estáticos em corpos de prova pré-trincados por fadiga — especificamente geometrias de flexão de ponto único, tração compacta e discoide — para derivar propriedades críticas como  $K_{Ic}$ ,  $J_c$  e curvas  $R$  ( $J-R$  ou  $\delta-R$ ), determinando se os resultados qualificam-se como propriedades intrínsecas do material independentes da geometria ou se são dependentes da espessura.

A norma descreve um método para determinar a tenacidade à fratura ( $K$ ,  $J$  e  $\delta$ ) submetendo corpos de prova pré-trincados por fadiga a carregamento lento, onde registros de força versus deslocamento são usados para avaliar a energia e identificar o início ou a estabilidade da extensão da trinca. A significância desses ensaios reside na caracterização da resistência do material à fratura sob condições severas de restrição, fornecendo dados essenciais para comparações de materiais, projetos estruturais e estimativas de vida útil, desde que os requisitos de validade sejam atendidos para definir se os resultados são propriedades intrínsecas independentes do tamanho ou dependentes da espessura. Para a execução, é exigido o uso de aparatos de precisão, incluindo máquinas de ensaio com controle rigoroso de alinhamento e taxa de carregamento, células de carga e medidores de deslocamento calibrados, além de dispositivos de fixação específicos (como manilhas ou dispositivos de flexão) projetados para minimizar o atrito durante o teste.

### 3.2 Procedimento de Ensaio

Os ensaios foram efetuados pelo Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), dos quais os resultados foram cedidos para a presente análise com fins educativos.

O procedimento de cálculo para a curva  $R$  em um corpo de prova do tipo SE(B) começa pela determinação da integral  $J$  para cada ponto do ensaio, somando-se suas componentes elástica e plástica ( $J = J_{el} + J_{pl}$ ). A componente elástica ( $J_{el}$ ) é calculada a partir do fator de intensidade de tensão ( $K$ ), que depende da carga aplicada ( $P_i$ ) e do comprimento instantâneo da trinca ( $a_i$ ). A componente plástica ( $J_{pl}$ ) é determinada por um método incremental que utiliza a área sob a curva força-deslocamento plástico e aplica correções baseadas no crescimento da trinca anterior, utilizando fatores geométricos específicos onde  $\eta_{pl} = 1.9$  e  $\gamma_{pl} = 0.9$  para a geometria SE(B).

Para obter o comprimento instantâneo da trinca ( $a_i$ ) necessário em cada passo, utiliza-se a técnica da compliância elástica, calculando-se primeiro a compliância ( $C_{(i)}$ ) a partir da inclinação das curvas de descarga/recarga. Este valor de compliância, ajustado pelo módulo de elasticidade e dimensões do corpo de prova, é usado para encontrar uma variável intermediária  $u$ , que é então inserida em uma função polinomial de quinta ordem calibrada para a geometria SE(B) para fornecer a razão  $a_i/W$ . A curva  $R$  final é gerada correlacionando os valores calculados de  $J$  com a extensão física da trinca ( $\Delta a$ ) ao longo do ensaio.

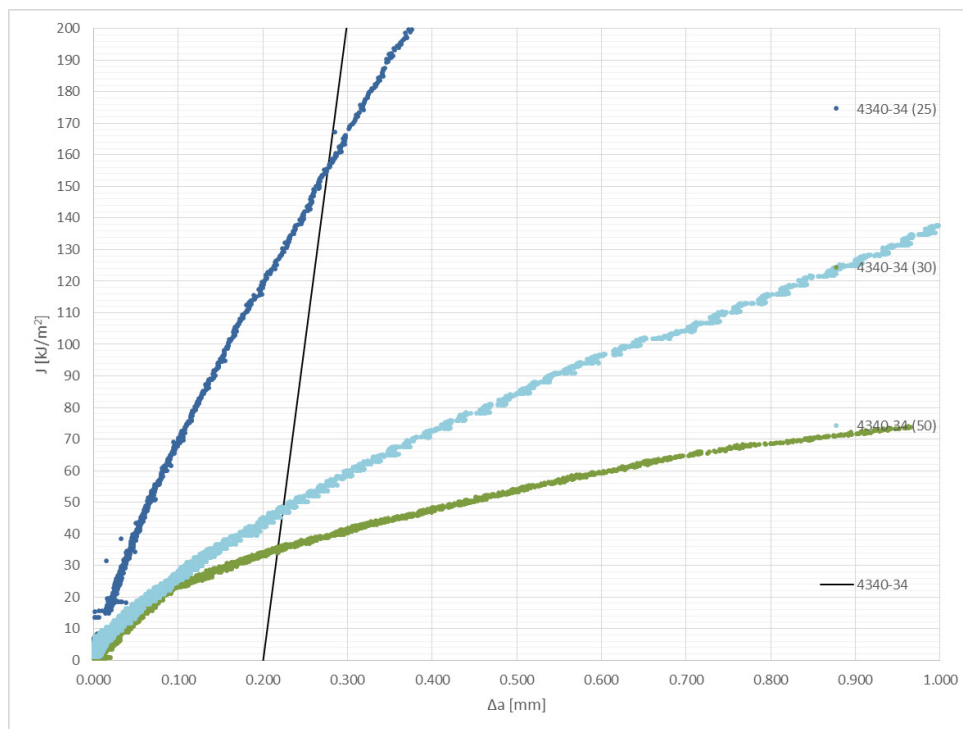


Figure 1: Curva R do Aço 4340 com 34 HRC.

## 4 Resultados

Com base na norma ASTM E1820, que estabelece os parâmetros para a caracterização da tenacidade à fratura através da curva de resistência (Curva R), podemos concluir o seguinte sobre o comportamento do aço 4340 (34 HRC) apresentado no gráfico da imagem 1:

### 4.1 Ensaio ao Ar (Linha Azul Escuro)

A linha azul escuro representa a tenacidade intrínseca do material em ambiente inerte (ar). O comportamento ascendente da curva  $J$  vs.  $\Delta a$  indica que o material exibe um comportamento dúctil e estável. À medida que a trinca avança, o material requer incrementos cada vez maiores de energia (Integral  $J$ ) para sustentar o crescimento da trinca. A inclinação acentuada desta curva reflete uma alta resistência ao rasgamento dúctil, característica esperada para um aço 4340 tratado para 34 HRC em condições normais.

### 4.2 Ensaio com o Meio Agressivo (Linhas Azul Claro e Verde)

Ao comparar com os ensaios em permeação de hidrogênio, observa-se uma drástica degradação das propriedades de tenacidade. As curvas azul claro e verde situam-se significativamente abaixo da curva de referência (ar), evidenciando o fenômeno de fragilização por hidrogênio.

1. Redução da Tenacidade: O valor de iniciação da fratura ( $J_{Ic}$  ou  $J_Q$ ) é severamente reduzido, indicando que a trinca começa a crescer com níveis de energia muito menores.
2. Perda de Resistência ao Crescimento: As curvas em ambiente agressivo tendem a ser mais planas (menor módulo de rasgamento), o que significa que, uma vez iniciada a

trinca, o material oferece pouca resistência à sua propagação, aproximando-se de um comportamento frágil/instável muito mais rapidamente do que no ensaio ao ar.

Em suma, a presença do hidrogênio comprometeu a capacidade do aço 4340 de deformar plasticamente na ponta da trinca, reduzindo drasticamente a energia necessária para levar o material à falha em comparação ao seu desempenho padrão ao ar.



## 5 Conclusão

O presente trabalho, elaborado com o auxílio da Inteligência Artificial (Google, 2025), cumpriu com êxito seu objetivo didático e experimental ao aplicar a metodologia da norma ASTM E1820 para quantificar a tenacidade à fratura do aço AISI 4340 (34 HRC), demonstrando a eficácia do método da compliância elástica com corpos de prova SE(B) na diferenciação do comportamento do material em ambientes distintos. Os resultados obtidos ilustraram de forma clara a severidade da fragilização por hidrogênio, onde a comparação entre as curvas de resistência (Curvas  $R$ ) revelou uma transição crítica de um comportamento dúctil e estável no ar, com elevada absorção de energia, para um estado de baixa tenacidade e instabilidade precoce sob permeação de hidrogênio. Desta forma, o estudo não apenas caracterizou a degradação das propriedades mecânicas do material frente a meios agressivos, mas também consolidou o entendimento prático sobre como parâmetros da mecânica da fratura elasto-plástica, como a Integral  $J$ , são ferramentas indispensáveis para a avaliação da integridade estrutural e seleção de materiais para condições de serviço severas.

## Referências

ANDERSON, Ted L; ANDERSON, Ted L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. [S. l.]: CRC press, 2005.

ASTM INTERNATIONAL. **Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness**. West Conshohocken, PA, 2025. DOI: 10.1520/E1820-25A. Available from: <https://www.astm.org/e1820-25.html>.

GOOGLE. **Gemini Pro**. [S. l.: s. n.], 2025. Large Language Model. Acessado em: 17 dez. 2025. Available from: <https://gemini.google.com/share/945fa326e266>.