

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

TÍTULO DO PROJETO DE TRABALHO DO PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

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. Δa 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

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

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. 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, 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, 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, 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 (Δa), 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 (δ). 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 δ) 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

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 (Δa) ao longo do ensaio.

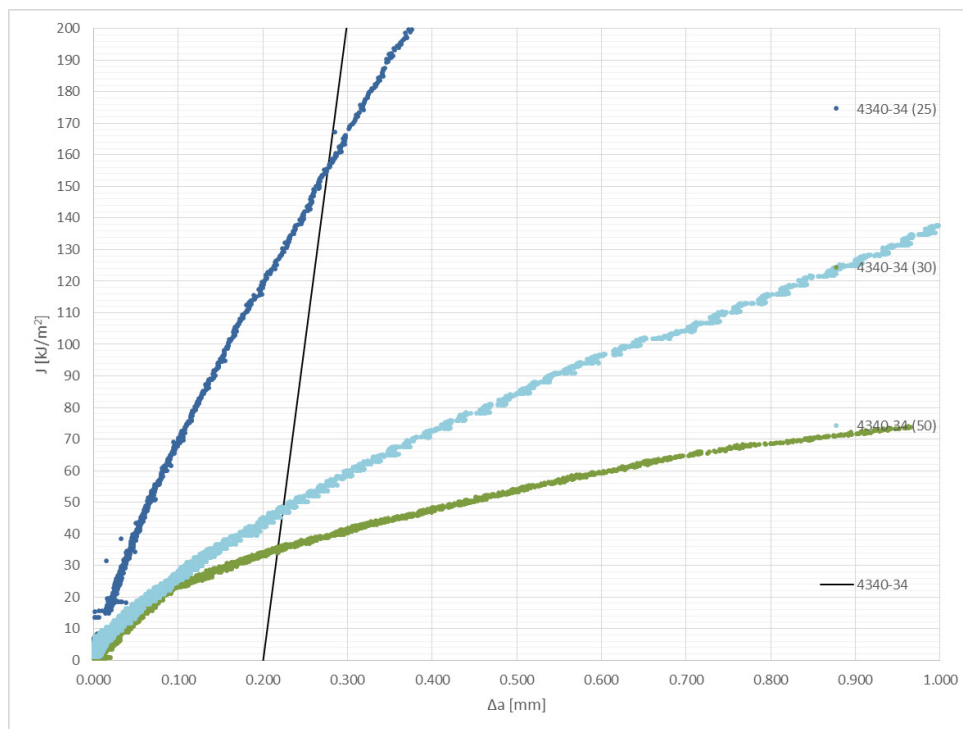


Figure 1: Curva R do Aço 4340 com 34 HRC.

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. Δa 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>.