

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NO TESTE DE IMPACTO DO AÇO HADFIELD EM UMA ANÁLISE DINÂMICA

Yago Francisco Soares Marins¹ (IC), Renata Neves Penha (PQ)¹

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

O aço Hadfield, ou aço manganês austenítico, tem grande relevância dentro da engenharia, pois apresenta propriedades mecânicas específicas como alta tenacidade e resistência ao desgaste, tornando-o necessário para trabalhos dentro das indústrias ferroviária e de mineração. O objetivo deste trabalho é analisar, por meio de uma análise dinâmica explícita, a resistência ao impacto do aço manganês austenítico através de um ensaio de impacto Charpy, cuja temperatura do corpo de prova sofrerá variação de -200 °C a 200 °C. Com aporte do método dos elementos finitos e utilizando o software ANSYS, observou-se que a variação da energia absorvida pelo corpo de prova foi relativamente baixa, visto que a maior temperatura atribuída para o corpo de prova no ensaio de impacto realizado foi de 200 °C. Além disso, obteve-se 1944,4 MPa como valor para tensão máxima de ruptura e com os dados de energia absorvida obtidos na simulação é possível determinar que não há transição dúctil-frágil para o aço Hadfield.

Palavras-chave: Aço Hadfield. Elementos finitos. Charpy. Análise dinâmica.

Introdução

Em 1882 surgiu o aço manganês austenítico, inventado pelo metalúrgico nascido em Sheffield, Sir Robert Abbott Hadfield (GIRALDO, 2012). Esse aço, que viria a ser denominado como aço Hadfield, ganhou destaque por ter grande capacidade de encruamento superficial, o que o distinguia dos demais materiais ferrosos usados em aplicações abrasivas. Dessa forma, teve suas aplicações destinadas para variada severidade, envolvendo impactos e/ou altas tensões de abrasão (TRINDADE, ROSSINO, SILVA, 2019).

Nos dias de hoje, o aço manganês austenítico de Hadfield é usado extensivamente, com pequenas modificações na composição e tratamento térmico, principalmente nas áreas de mineração, perfuração de poços de petróleo e siderurgia (ASM INTERNATIONAL, 2005).

Com base na alta aplicabilidade do aço Hadfield, justifica-se a necessidade de novas pesquisas e desenvolvimento de novos métodos experimentais para continuar a ampla utilização desse aço na indústria. Dado o exposto, o presente trabalho integra esse propósito, com objetivo geral de analisar a resistência ao impacto do aço manganês austenítico e seu comportamento com a variação da temperatura a partir de uma análise dinâmica pelo método dos elementos finitos.

Para alcançar o objetivo proposto para esse trabalho, a partir do software ANSYS, será construído

uma biblioteca de materiais com as propriedades do aço Hadfield e realizada uma simulação, pelo método de dinâmica explícita, de um ensaio de impacto Charpy. Como resultado, busca-se analisar a fratura do corpo de prova e a absorção de energia do aço Hadfield em relação a variação da temperatura.

Metodologia

Análise dinâmica

Problema dinâmico é um problema em que a escala de tempo tem uma importância muito grande, que no caso de um ensaio de impacto o foco está no curto gradiente de tempo do impacto do martelo com o corpo de prova. Além disso, diferente de problemas estruturais que tem comportamento estático, a somatória das forças não é constante, sendo assim, não se busca uma solução de equilíbrio (ALVES FILHO, 2008).

Uma análise dinâmica pode utilizar de métodos implícito ou explícito para solução. Um dos pontos fundamentais que se deve levar em consideração nessa escolha é a questão da magnitude do tempo, ou seja, a duração real do evento que se está tentando resolver. Quanto maior a duração real do fenômeno, tende-se a ter um problema cada vez menos não linear, sendo assim mais adequado ao método implícito. De outra forma, quanto mais curto o gradiente de tempo de um problema de engenharia que se está tentando resolver, mais não linear esse problema será, fazendo com que uma solução pelo método explícito seja mais adequada.

Implícito e explícito dizem respeito a dois métodos de integração no tempo utilizados em análises dinâmicas. O método explícito é mais preciso e eficiente para simulações envolvendo propagação de ondas, grandes deslocamentos e deformações, não-linearidade de material, contatos avançados, erosão, falha, fragmentação e flambagem não-linear (ALVES FILHO, 2008).

Impacto a baixas e médias velocidades, processos de manufatura e análises envolvendo grandes não-linearidades são alguns dos exemplos clássicos de soluções que são mais adequadas para o método explícito.

Biblioteca de materiais

Uma das principais vantagens do método explícito é a facilidade em modelar falha e separação de materiais. Os três modelos mais simples são os de falha por deformação plástica, tensão principal e deformação principal. Para esse modelo utilizou-se modelo de falha por deformação plástica.

Com os dados do material levantados, é preciso criar uma biblioteca de materiais para o aço Hadfield no módulo de *Engineerind Data* do ANSYS. Como será atribuído falha ao material, será preciso inserir não linearidade de material para o corpo de prova, utilizando o limite de escoamento para atribuir o método bilinear para compor a solução da análise.

Para obter resultados válidos para o estudo proposto, é necessário inserir o valor do coeficiente de Poisson para aços que é de aproximadamente 0,3, como também o valor do módulo de elasticidade, que para o aço Hadfield equivale a 203 GPa. Além disso, já que o estudo envolve a variação da temperatura em um ensaio de impacto, é preciso atribuir a temperatura de fusão para o aço, que foi considerado 1600 °C.

Atribuição dos contatos

Nas análises em elementos finitos, duas superfícies separadas se tocam de tal forma que se tornam mutuamente tangentes, então dizem estar em "contato". As condições de contato são criadas quando um conjunto é importado para a aplicação e detecta que dois corpos separados (corpos sólidos, superficiais e de linha) se tocam (eles são mutuamente tangentes).

Na maioria das vezes, o auto-contato define a superfície *master* (comandante) e do *slave* (dependente). Entretanto, quando problemas complexos, como a não linearidade, envolvem poucos contatos manuais

necessários, precisa-se tomar uma decisão que deve ser *master* ou *slave*. Em geral, a superfície comandante está no corpo tocado ou o com o corpo em movimento que entrará em contato, enquanto a superfície dependente está no corpo tocando, ou no corpo em movimento que irá formar contato com outro corpo.

Para as condições do ensaio deste relatório, foi utilizado o algoritmo de contato *single surface*, que promove o contato entre todas as faces de todos os corpos especificados. Esse é o tipo mais geral de contato, através dele o *software* busca por contatos em todas as superfícies externas do modelo para verificar se houve penetração. Não é necessário definir superfícies *master* ou *slave*, dado que a busca é feita automaticamente de forma geral no modelo, em que a cada passo de tempo é verificado se houve penetração de algum nó em alguma superfície.

Formulação de elemento e geração de malha

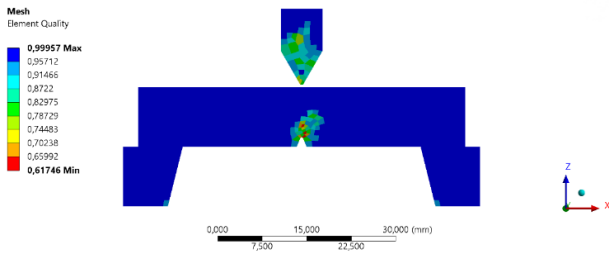
Como regra geral, elementos utilizados em análises dinâmicas explícitas são de primeira ordem, hexaédricos de oito nós, tetraédricos e cascas de quatro nós. Isso ocorre porque o ganho de precisão em usar elementos de segunda ordem não compensa o aumento no peso computacional, o que é especialmente em análises explícitas (ALVES FILHO, 2008).

Para compor a malha foi utilizado elementos sólidos hexaédricos, onde optou-se pela formulação *exact*. Essa formulação é linear, possui integração reduzida e deformação constante, além disso, faz uso do volume exato na integração, mesmo sob grandes distorções.

Além disso, buscando preenchimento de malha, foi utilizado elementos tetraédricos com formulação *nodal based strain*, pois das três formulações disponíveis é a que apresenta formulação mais avançada e não apresenta erros em condições de contorno dominadas por flexão. Entretanto, por apresentar resultados com maior acurácia, possui maior peso computacional (ALVES FILHO, 2008).

Após a formulação dos elementos, foi gerado uma malha hexadominante contendo 6347 elementos e 7752 nós. Considera-se como elementos de alta qualidade para valores próximos de um e elementos com graus de distorção, próximos de zero. A Figura 1 ilustra a qualidade dos elementos após a discretização da malha.

Figura 1: Qualidade dos elementos da malha gerada para a simulação.



Comportamento da simulação

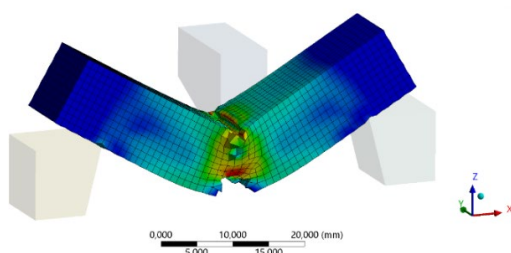
Com a malha gerada, será inserido as condições de contorno para iniciar a obtenção dos resultados. Dessa forma, para os suportes do corpo de prova será aplicado suporte fixo, buscando restringir quaisquer movimentações dos componentes. Além disso, para o cutelo, será atribuído a velocidade do teste buscando que ao final do tempo da simulação, o corpo de prova tenha sofrido a fratura necessária para dividi-lo em duas partes, separadas pelo entalhe.

Dessa forma, foi atribuído diferentes temperaturas para o corpo de prova. Após a obtenção dos resultados, analisou-se a variação da energia absorvida pelo corpo de prova nas temperaturas adotadas e o comportamento da fratura, buscando identificar uma possível transição de uma fratura frágil para uma fratura dúctil.

Resultados e discussão

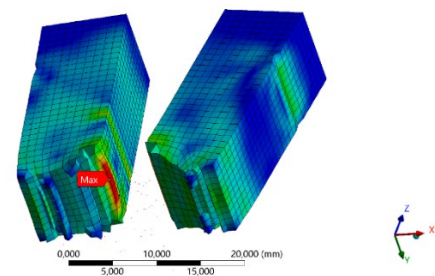
A partir dos dados coletados para a elaboração da biblioteca de materiais, e criação de modelos de falha com as propriedades do aço Hadfield, foi possível analisar a fratura do corpo de prova, como também a deformação sofrida. A Figura 2 apresenta o momento em que o cutelo penetra o corpo de prova. Devido a força de impacto ser maior do que a resistência de cada elemento da malha, houve a falha já esperada, gerando a fratura no corpo de prova que pode ser analisada.

Figura 2: Rompimento característico Charpy



Após o rompimento do corpo de prova, nota-se que o comportamento da fratura é predominantemente dúctil que apesar da alta dureza do material, que para o aço Hadfield com 12% de molibdênio o valor da dureza é de 61,2 HRC, a estrutura é austenítica e altamente maclada, o que confere ductilidade. Nota-se, ainda nas Figuras 3 e 4 a formação de lábios cisalhantes e expansão lateral, que caracterizam uma fratura dúctil. A deformação nodal para os elementos na área da fratura varia de 8,28 mm a 10,44 mm, sendo deformação mínima e máxima respectivamente.

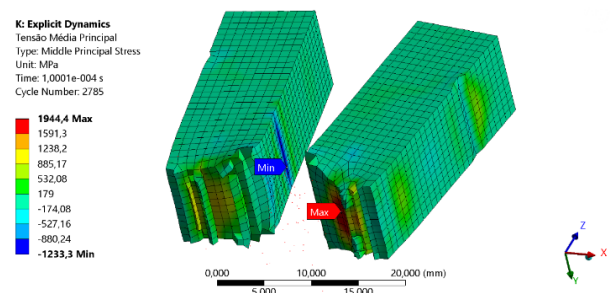
Figura 3: Comportamento da fratura e concentração de tensão



Para avaliar o comportamento da simulação e a acurácia dos resultados, foi obtido o valor da tensão de ruptura do corpo de prova e comparada com os valores disponíveis em bibliografias. Segundo Lee and Chen (2002), a tensão de ruptura para o aço Hadfield com 12% de molibdênio a uma taxa de deformação de 5×10^{-3} s é de 1817,5 MPa.

Como mostrado na Figura 4, o valor para tensão média principal encontrado na simulação foi de 1944,4 Mpa, esse valor corresponde a tensão máxima de ruptura do material. A disparidade dos resultados é devido a qualidade da malha e a simplificação do contato, uma vez que não foi atribuído atrito entre os componentes. Além disso, a limitação da biblioteca de materiais faz com que o ANSYS atribua resultados com uma margem de erro associada.

Figura 4: Tensão média principal



Como último dado, foi obtido os valores para energia absorvida do corpo de prova que é o resultado do ensaio de impacto. Além disso, extraiu-se dados de absorção de energia para diferentes temperaturas de simulação, no caso para uma variação de -200 °C a 200 °C.

Além disso, (SANTOS, 2022) através da realização de ensaios de impacto com corpos de prova de aço Hadfield, cujas amostras passaram por tratamento térmico de têmpera e foram resfriadas em diferentes soluções de 0% NaCl, 1% NaCl e 3% NaCl, obteve respectivamente valores médios de energia de impacto de 57,6 J, 65,6 J e 72,8 J, corroborando os resultados obtidos da simulação. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos, mostrando que não há transição dúctil-frágil para este aço.

Tabela 1: Valores da temperatura e energia absorvida para o aço Hadfield, ANSYS.

Temperatura (°C)	Energia absorvida (J)
-200	65,399
-100	67,459
0	68,292
100	75,586
200	76,945

Conclusões

Esse trabalho consistiu na análise da energia absorvida em um corpo de prova de aço Hadfield, realizada através de uma análise dinâmica explícita no software ANSYS. Além disso, foi possível comparar a tensão de ruptura do ensaio realizado pelo método dos elementos finitos com ensaios reais de impacto, analisando fratura e a concentração de tensão no decorrer da simulação.

Com a análise dos resultados obtidos, é plausível apontar a grande aplicabilidade de simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos. Além disso, tendo como base os resultados alcançados em simulações como a de um ensaio de impacto Charpy, é possível replicar e expandir ensaios de grande importância na engenharia, tornando processos mais baratos e utilizando de modelos numéricos para fundamentar trabalhos e pesquisas acadêmicas.

O trabalho desenvolvido tem perspectivas de continuidade, podendo replicar a simulação para diferentes materiais, e em diferentes temperaturas sendo capaz de observar e comprovar o comportamento em um

gráfico da energia absorvida *versus* temperatura. Outra perspectiva de continuidade é realizar um ensaio de tração e impacto para atribuir dados para a biblioteca de matérias no software e comparar os dados da simulação com os dados reais do ensaio.

Agradecimento

Quero agradecer a minha professora orientadora, Renata Neves Penha que ofereceu todo suporte necessário para que essa pesquisa fosse realizada, contribuindo para meu crescimento pessoal e acadêmico.

E um grande agradecimento a UNIFEI, que me ofereceu a bolsa para a realização dessa pesquisa, tornando tudo possível.

Referências

ALVES FILHO, A. **Elementos finitos: A Base da Tecnologia CAE – Análise Dinâmica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook - properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. Estados Unidos da America: ASM International, 2005, v.1. 2521p.

GIRALDO, A. V. **El Hadfield revisitado**. *Revista Colombiana de Materiales*, no 3, pp. 1 - 4, 2012.

LEE, W. S. CHEN, T. H. **Plastic deformation and fracture characteristics of Hadfield steel subjected to high-velocity impact loading**, 2002.

SANTOS, A. M. **Influência da têmpera em soluções salinas de NaCl na resistência ao impacto do Aço Hadfield**, 2022.

TRINDADE, A. B. M. ROSSINO, L. S. SILVA, G. N. Silva, **Análise da variação do teor de manganês e cromo na resistência ao desgaste abrasivo dos aços austeníticos ao manganês Hadfield**. ENEMET – Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. 2019.