



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

VINICIUS SALES CARDOSO

Análise por elementos finitos de um corpo de prova Charpy-V de um aço API 5CT N80Q

Guaratinguetá - SP

2023

Vinicius Sales Cardoso

Análise por elementos finitos de um corpo de prova Charpy-V de um aço API 5CT N80Q

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá - SP

2023

C268a	Cardoso, Vinícius Sales Análise por elementos finitos de um corpo de prova Charpy-V de um aço API 5CT N80Q / Vinícius Sales Cardoso – Guaratinguetá, 2023. 69 f : il. Bibliografia: f. 67-69 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Aço de alta resistência. 2. Análise de elementos finitos. 3. Ligas de aço. I. Título. CDU 669.194
-------	---



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

VINICIUS SALES CARDOSO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO(A) EM NOME DO CURSO”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador(a)

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento
Orientador(a)/UNESP-FEG

Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho
UNESP-FEG

Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães
UNESP-FEG

Janeiro 2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a minha família, por todo o apoio e incentivo em todos os momentos que eu precisei, sem o qual não chegaria aqui. Principalmente aos meus pais, Vera e Jorge, que sempre me serviram como fonte de inspiração e sempre me deram apoio incondicionalmente.

Ao Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento pelo auxílio e dedicação na orientação desta obra, sempre atencioso ao esclarecer dúvidas ou ajudar em eventuais dificuldades.

Aos meus colegas e amigos de faculdade por sempre estarem juntos durante esta importante jornada.

A instituição UNESP e todos os colaboradores que possibilitaram tudo isso, sem eles este trabalho não seria possível.

A empresa Ansys Inc. por disponibilizar o software de maneira gratuita, sem isso este estudo não seria possível.

À empresa Apolo Tubulars S.A. pela doação dos tubos de aço API N90Q, o que possibilitou a realização dos ensaios Charpy-V utilizados como referência neste estudo.

“Motivation is the art of making people do what you want them to do because they want to do it”;

Dwight Eisenhower

RESUMO

Com o desenvolvimento do poder computacional e os avanços tecnológicos vem permitindo com que cada vez mais os computadores solucionem diversos tipos de problemas matemáticos. Isso aliado ao método de elementos finitos permite que alguns ensaios destrutivos possam ser analisados via simulação computacional. Por este motivo o uso de softwares de FEA (Finite Element Analysis) dentro do ambiente industrial vem crescendo, pois acaba sendo um meio de simular diversas situações antes de o produto entrar no mercado. Este estudo tem como o objetivo analisar o uso de um software de FEA para realizar o ensaio Charpy-V de um aço API 5CT grau N80 tipo Q e ver se é possível utilizar a simulação computacional para realizar o ensaio. Durante este estudo foram analisadas duas situações: em uma primeira situação sem a presença do raio de entalhe; e uma segunda análise aonde foi ensaiada com o raio conforme descrito pela norma; uma outra análise foi feita variando o nível de refinamento da malha, com o objetivo de ver o efeito da mesma durante as simulações. Com isso os corpos de prova e o ensaio foram modelados usando o software Ansys, foi aplicada a metodologia de destruição do material descrita por Johnson-Cook. A conclusão obtida ao analisar o resultado dos testes foi que tanto o raio quanto o tamanho da malha acabaram por influenciar nos resultados do ensaio Charpy-V, durante os testes foram encontrados valores entre 30 e 50 J, valores próximos aos exigidos pela norma API. Os resultados obtidos sugerem que este método de estudo é bem condizente a valores encontrados em ensaios Charpy-V para este material e acabam sendo uma solução para realização deste tipo de ensaio dentro do âmbito computacional, porém o método estudado indica que este tipo de ensaio ainda está ligado a diversos fatores empíricos.

PALAVRAS-CHAVE: API 5CT N80Q. Charpy-V. Elementos Finitos. Malha. Johnson-Cook.

ABSTRACT

The development of computational power and technological advances has allowed computers to solve several types of mathematical problems. This, combined with the finite element method, allows some destructive tests to be analyzed via computer simulation. For this reason, the use of FEA (Finite Element Analysis) software within the industrial environment has been growing, as it ends up being a means of simulating different situations before the product enters the market. This study aims to analyze the use of FEA software to perform the Charpy-V test of an API 5CT grade N80 type Q steel and see if it is possible to use computer simulation to perform the test. During this study, two situations were observed: in a first situation without the presence of the notch radius; and a second analysis where it was tested with the radius as described by the standard; another analysis was performed by varying the mesh refinement level, to see its effect during the simulations. Thus, the specimens and the test were modeled using the Ansys software, and the material destruction methodology described by Johnson-Cook was applied. The conclusion when analyzing the results of the tests was that both the radius and the size of the mesh were able to influence the results of the Charpy-V test, during the tests values between 30 and 50 J were found, values close to those required by the API standard. The suggested results suggest that this study method is very consistent with the values found in Charpy-V tests for this material and end up being a solution for carrying out this type of test within the computational scope, however, the studied method indicates that this type of test is still linked to several empirical factors.

KEYWORDS: API 5CT N80Q. Charpy-V. Finite Element. Mesh. Johnson-Cook.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Simulação de produto realizada com base em análise de elementos finitos	15
Figura 2- Nós e elementos presentes em uma malha	16
Figura 3 - Navio que fraturou de maneira frágil pela propagação de uma trinca em seu casco	17
Figura 4 - (A) Representação do aparato de ensaio de impacto e do (B) corpo de prova do tipo Charpy.	18
Figura 5 - Fluxo de classificação simplificada do aço	20
Figura 6 - O efeito do teor de carbono na energia de impacto.	21
Figura 7 - Elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a sua dureza	23
Figura 8 - Corpos de prova Charpy, recomendados pela ASMT E-23 para ensaio de impacto.	26
Figura 9 - Curva resposta de ensaio de impacto para transição da temperatura dúctil frágil... ..	27
Figura 10 - Processo de análise por Elementos Finitos	28
Figura 11 - Modelo e elemento simples de mola.....	29
Figura 12 - Alguns Elementos Finitos Comuns.....	31
Figura 13 - Modelos de elementos finitos para pistão (a), biela (b) e virabrequim (c) de um motor.	33
Figura 14 - Analise de tensões por elementos finitos de um alicate de crimpagem.	34
Figura 15 - Resultados do refino de malha.....	35
Figura 16 - Configuração Recomendada pela Ansys.....	42
Figura 17 - Informações do Computador utilizado.....	43
Figura 18 - Fluxo de Processos gerado pelo Ansys	45
Figura 19 - Tipos de Análises.....	47
Figura 20 - Propriedades do Martelo	49
Figura 21 - Propriedades dos suportes do corpo de prova	49
Figura 22 - Propriedades do corpo de prova	48
Figura 23 - Tensão x Deformação SAE 4130 Johnson-Cook	50
Figura 24 - Desenho do conjunto ensaiado	51
Figura 25 - Estado de Rigidez	52
Figura 26 - Seleção dos materiais para cada objeto.....	53
Figura 27 - Regiões de contato	53

Figura 28 - Geração da malha.....	54
Figura 29 - Condições Iniciais do sistema	55
Figura 30 - Vetor Velocidade	56
Figura 31 - Ajustes da simulação.....	57
Figura 32 - Suportes do corpo de prova.....	57
Figura 33 - Opções da simulação.....	58
Figura 34 - Aba Solver Output	59
Figura 35 - Animação da simulação	59
Figura 36 - Gráfico de Energia da Simulação	60
Figura 37 - Efeito da malha no Entalhe	64
Figura 38 - Efeito da superfície Fraturada	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química em fração mássica [%]	24
Tabela 2 - Especificações de dureza	25
Tabela 3 - Especificação de energia mínima absorvida Charpy.....	25
Tabela 4 - Elementos Aço 5CT N80 tipo Q e AÇO SAE 4130	44
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Aço 5CT N80 tipo Q e Aço SAE 4130.....	44
Tabela 6 - Valores das variáveis de Johnson-Cook	45
Tabela 7 - Propriedades Mecânica, elástica e Térmica do Aço SAE 4130.....	45
Tabela 8 - Resultados das Simulações	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FEA	<i>Finite Element Analysis</i>
H_q	Posição inicial
H_r	Posição final
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
GDL	Grau de Liberdade
AFIT	<i>Air Force institute of Technology</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
J	Joule

LISTA DE SÍMBOLOS

Fe	Ferro
C	Carbono
V	Vanádio
Ti	Titânio
Nb	Nióbio
Si	Silício
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
Cu	Cobre
S	Enxofre
Mn	Manganês
k_h	Constante da Mola
f	Força no nó
Δu	Variação no Comprimento
$\dot{\gamma}$	Tensão de Cisalhamento
ρ	Densidade do deslocamento
v	Velocidade do deslocamento
$\dot{\epsilon}$	Taxa de Deformação por Cisalhamento
σ	Tensão de von Mises
A	Tensão de Rendimento
B	Coeficiente de Tensão Plástica
ϵ	Tensão Plástica
n	Coeficiente de Tensão Plástica
C	Coeficiente da Taxa de Deformação Plástica
$\dot{\epsilon}_0$	Normalizador de Taxa de Deformação
m	Coeficiente térmico
T_f	Temperatura de Fusão

T	Temperatura
σ_{flow}	Tensão de Cisalhamento
σ_{yield}	Tensão de Escoamento
Σ	Somatório
$\Delta\epsilon^p$	Incremento Equivalente a Tensão Plástica acumulada
ν	Coeficiente de Poisson
E	Modulo de Elasticidade
C_p	Coeficiente Especifico
β	Fração de Calor Inelástico
E_c	Energia Cinética
M	Massa
V	Velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	14
1.2	OBJETIVO DESTE TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	AÇOS	19
2.1.1	Classificação dos aços	19
2.1.2	Aços de Alta Resistencia e Baixa Liga (ARBL)	20
2.1.3	Influência de elementos de liga.....	21
2.2	AÇO API 5CT GRAU N80Q.....	23
2.2.1	Norma API.....	23
2.2.2	Composição química conforme API.....	24
2.2.3	Propriedades mecânicas conforme API	25
2.3	ENSAIO CHARPY-V	25
2.4	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS.....	27
2.4.1	O método dos elementos finitos	28
2.4.2	Tipos de elementos	31
2.4.3	Malha	33
2.4.3.1	Densidade da malha	34
2.4.3.2	Refino da malha.....	34
2.4.3.3	Convergência.....	35
2.5	EFEITOS DINÂMICOS E TÉRMICOS	35
2.6	LEIS CONSTRUTIVAS E CRITÉRIOS DE DANOS	37
2.6.1	Equação do critério Johnson-Cook.....	37
2.6.2	Critério de falha de Johnson-Cook	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	MATERIAIS	42

3.1.1	Software e tipo de análise	42
3.1.2	Definição do material.....	43
3.1.2.1	Constantes de Johnson-Cook.....	44
3.2	MÉTODOS.....	45
3.2.1	Setup do tipo de análise	46
3.2.2	Setup do material e a suas propriedades.....	48
3.2.3	Modelagem das geometrias envolvidas no ensaio	50
3.2.4	Setup do modelo.....	51
3.2.5	Definição da carga e apoio da simulação	54
3.2.6	Solução da simulação	58
3.2.7	Resultado da simulação	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1	ENSAIO CHARPY V.....	61
4.2	EFEITO DA MALHA NO ENTALHE	63
4.3	SUPERFÍCIE FRATURADA	65
5	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

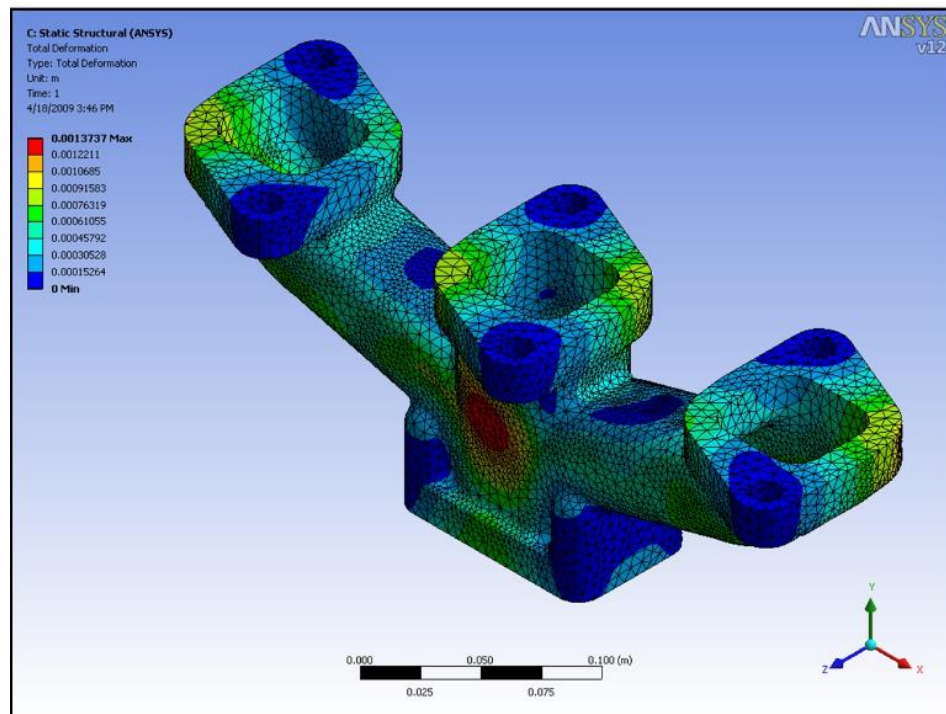
A simulação computacional é amplamente utilizada nas empresas para realizar análises e melhorar a qualidade dos produtos e projetos. Grande parte dessas análises são realizadas por meio de softwares que utilizam o Método dos Elementos Finitos, os quais possibilitam a obtenção de respostas para inúmeros problemas de engenharia. (MIRLISENNA, 2016)

A geometria submetida aos carregamentos e restrições é subdividida em pequenas partes, denominadas de elementos, os quais passam a representar o domínio contínuo do problema. A divisão da geometria em pequenos elementos permite resolver um problema complexo, subdividindo-o em problemas mais simples, o que possibilita ao computador realizar com eficiência estas tarefas. (MIRLISENNA, 2016)

O método propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas seja substituído por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamadas de “elementos finitos” – termo que nomeia o método. (MIRLISENNA, 2016)

O método pode ser aplicado na resolução e diagnóstico de problemas de análise estrutural por meio da obtenção de deslocamentos, deformações e tensões, também permite representar diversos cenários e avaliar o desempenho de produtos com a aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga. Além disso variações do Método dos Elementos Finitos viabilizam a análise térmica, acústica, dinâmica, eletromagnética e de fluídos para casos mais simples de comportamento linear ou outros não lineares, como quando há grandes deslocamentos ou contato entre partes de uma montagem.

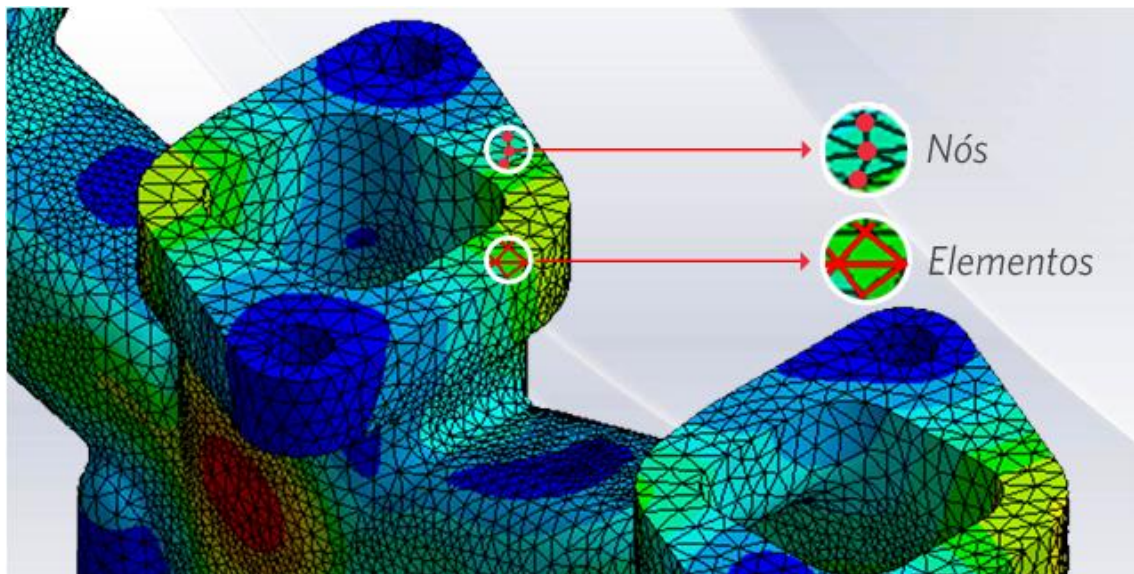
Figura 1 - Simulação de produto realizada com base em análise de elementos finitos.



Fonte: Mirlissena (2016).

As tensões variam através do contínuo de qualquer componente. Dividindo esse componente em um número finito de elementos discretos conectados pelos seus nós (chamados de malha), pode-se obter uma aproximação das tensões e deformações, em qualquer parte do componente, para um dado conjunto de condições de contorno e de cargas aplicadas em alguns nós da estrutura. A aproximação pode ser melhorada pelo uso de mais elementos de tamanho menor, ao custo do aumento do tempo de processamento. Com as atuais velocidades de processamento (que continuarão aumentando no futuro) o problema será menor do que nos primeiros dias de uso do FEA. Parte do problema do analista é escolher o tipo apropriado, o número e a distribuição de elementos para otimizar o dilema entre precisão e o tempo de processamento. Os elementos de maior tamanho podem ser usados em regiões da peça onde o gradiente (inclinação) de tensão varia suavemente. Nas regiões onde o gradiente de tensão muda rapidamente, próximo a concentrações de tensão ou cargas aplicadas, por exemplo, uma malha mais fina (refinada) é necessária (NORTON et al., 2013).

Figura 2- Nós e elementos presentes em uma malha.



Fonte: Mirlissena (2016).

Para a viabilização de qualquer projeto de engenharia, é preciso um vasto conhecimento das características, propriedades e comportamento dos materiais. A determinação destas características e propriedades mecânicas de um material metálico é obtida por meio de vários ensaios mecânicos (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012; SOUZA, 1982).

Os ensaios mecânicos são realizados por meio de aplicação de uma das formas de energia em um material (tração, compressão, flexão, impacto, torção e outros), para determinar a resistência de um material a cada um destes esforços (SOUZA, 1982).

Durante a Segunda Guerra Mundial, o fenômeno de fratura frágil despertou o interesse dos engenheiros, devido à alta ocorrência desse tipo de fratura em estruturas de aço soldados de navios e tanques de guerra. A Figura 3 mostra um navio ancorado que se partiu ao meio devido à fragilização do material (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

Figura 3 - Navio que fraturou de maneira frágil pela propagação de uma trinca em seu casco.



Fonte: Callister (2015).

Notou-se que esse tipo de fratura tinha maior incidência nos meses de inverno, e que problemas semelhantes já haviam ocorrido com outras estruturas metálicas (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

É possível notar dois tipos de fratura, a fratura frágil e a fratura dúctil. A fratura frágil nos metais é definida pela rápida propagação de trinca, ocorre com baixa absorção de energia, ou seja, nenhuma ou pouca deformação plástica, rompendo o metal de forma repentina. Já a fratura dúctil absorve muita energia antes da ruptura, pode-se observar que antes do material se romper por fratura dúctil, ele tem uma deformação plástica considerável (CALLISTER, 2015).

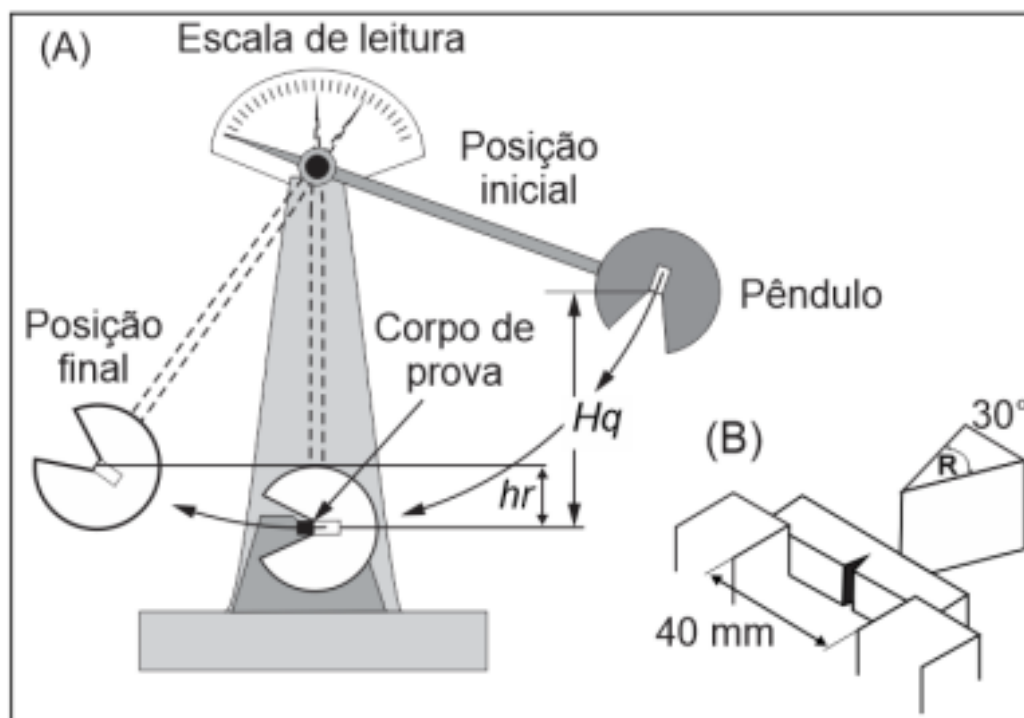
O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico utilizado na análise de fratura frágeis nos materiais, ele permite a constatação de diferenças de comportamento de materiais que não podem ser observados em outros ensaios (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

Os ensaios de impacto foram projetados e são utilizados até hoje para medir a energia que um material absorve antes de romper. Para o ensaio de impacto, o corpo de prova possui o formato de uma barra com seção transversal quadrada. No ensaio de impacto Charpy o corpo de prova é apoiado horizontalmente, conforme pode ser observado no detalhe (B) da Figura 4 (CALLISTER, 2015; GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

A carga de impacto é aplicada instantaneamente através de um martelo pendular que é liberado a partir de uma posição inicial (Hq) conhecida. Após o martelo ser liberado, sua ponta se choca com o corpo de prova com um entalhe, que funciona como um concentrador de tensões. O pêndulo continua o movimento após o choque até uma altura (hr) menor que a altura inicial de liberação do martelo pendular (Hq). A energia absorvida no impacto é determinada

pela diferença de Hq e Hr . O detalhe (A) da Figura 4 representa o equipamento para o ensaio de impacto (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

Figura 4 - (A) Representação do aparato de ensaio de impacto e do (B) corpo de prova do tipo Charpy.



Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

1.2 OBJETIVO DESTE TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo: analisar a viabilidade de se utilizar o método de elementos finitos para simular o ensaio Charpy-V em um aço API 5CT N80Q, avaliando dentro das simulações, tanto o impacto da geometria, quanto a variação do tamanho da malha. A geometria foi analisada em duas situações, o primeiro estudo foi realizado sem a presença do raio dentro do entalhe do corpo de prova; o segundo cenário consistiu em analisar a geometria com o raio de 0,25mm dentro do entalhe do corpo de prova. Com a modelagem dos dois cenários, foi possível estudar o efeito do tamanho da malha para os dois tipos de geometria. Em resumo, este estudo tem como justificativa diminuir o grande volume de ensaios Charpy, necessário para aprovar um procedimento e/ou processo de fabricação de um novo aço, ou processo de conformação, reduzindo tanto o tempo quanto a perda de material para realizar esta análise via ensaio Charpy-V de maneira convencional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AÇOS

Os Aços são ligas de ferro (Fe) e carbono (C), que podem apresentar certa quantidade de concentração de alguns outros elementos da liga; atualmente existem e são aplicadas milhares de ligas com composições e/ ou tratamentos térmicos diferentes, variando de acordo com a exigência da situação. As propriedades mecânicas são sensíveis e podem apresentar alterações de acordo com o teor de carbono, que geralmente são inferiores a 1%. Os aços mais comuns são classificados de acordo com o seu teor de carbono apresentado entre baixo e alto, elevado e médio. Também existem subclasses dos aços de acordo com o teor de outros elementos existentes na liga. Os aços-carbonos comuns apresentam apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono e um pouco de manganês. Nos aços-liga, alguns outros elementos de liga são adicionados de forma estratégica em concentrações específicas (PROVENZA, 1982; CALLISTER, 2008).

2.1.1 Classificação dos aços

Os aços podem ser classificados em grupos, em base de propriedades comuns (SOCIETY OF AUTOMOTIVE, 2018):

- a- Composição, como aços-carbono e aços-liga;
- b- Processo de acabamento, como aços laminados a quente ou aços laminados a frio;
- c- Forma do produto acabado, como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais.

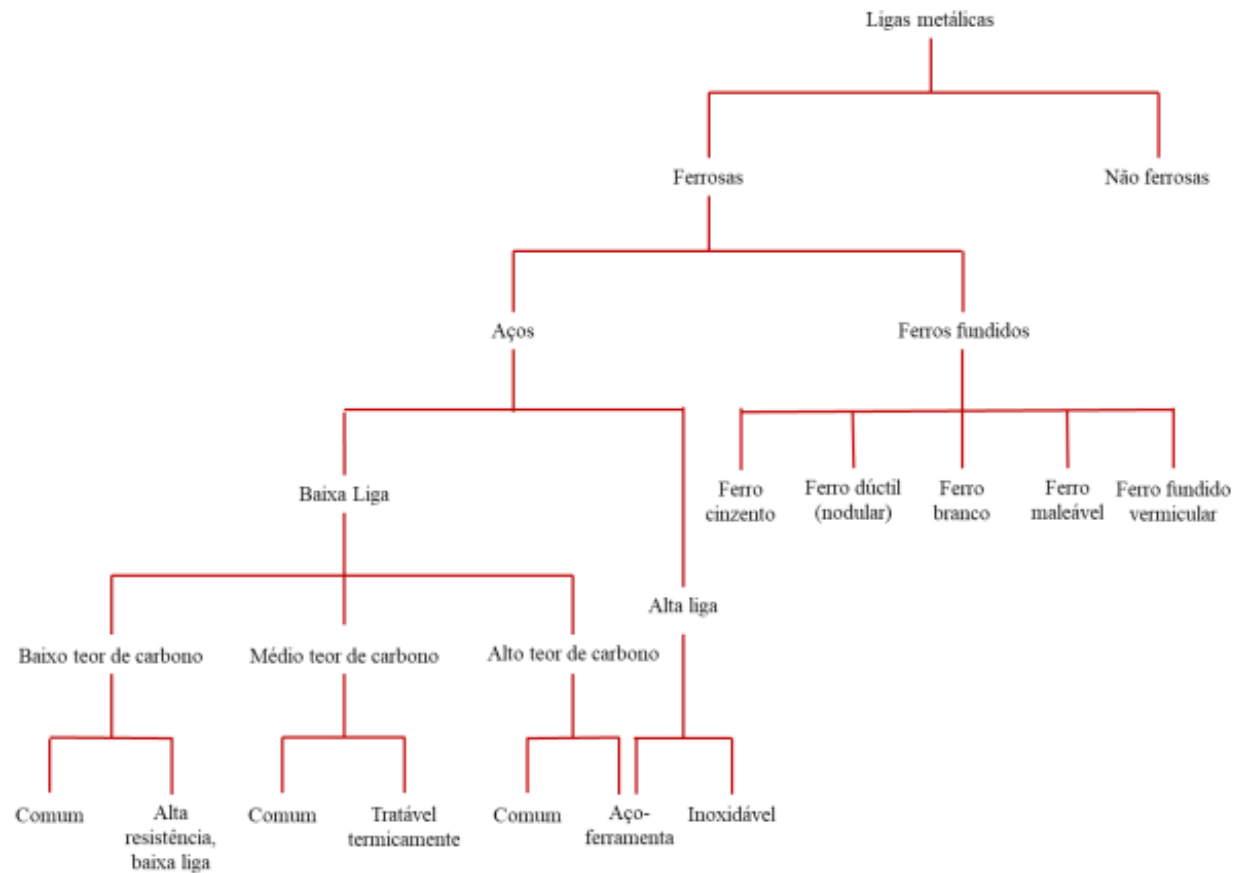
Interação entre os critérios de classificação do aço:



O método de classificação mais usual é através de sua composição química, sendo esta a mais utilizada para especificações técnicas do material (RUDOLF STEINER, 1990).

Na Figura 5 é possível observar os principais grupos de ligas metálicas com base em sua constituição química.

Figura 5 - Fluxo de classificação simplificada do aço.



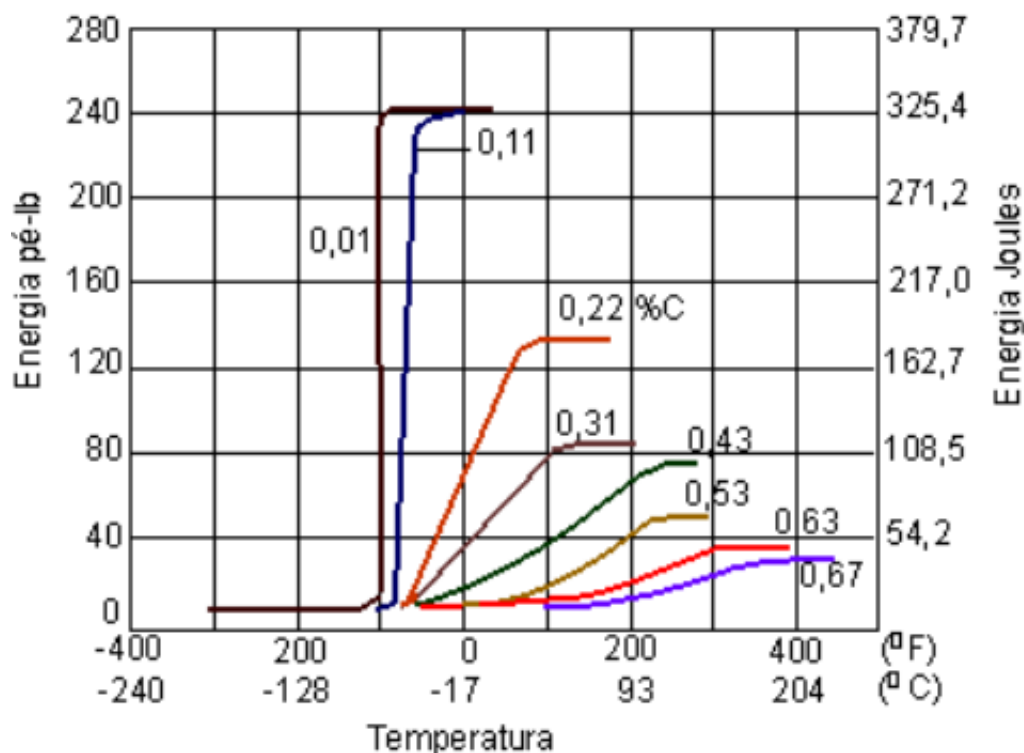
Fonte: Callister e Rethwisch (2012).

2.1.2 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços ARBL apresentam resistência entre 300 e 700 MPa, tendo sido desenvolvidos para elevar a relação entre resistência e peso, visando aplicação em estruturas moveis. A soma de elementos de liga geralmente não ultrapassa a 2%, e o teor de carbono situa-se abaixo de 0,3% (COLPAERT e COSTA E SILVA, 2008)

Na Figura 6 é possível observar o comportamento energia de impacto em função da concentração de carbono.

Figura 6 - O efeito do teor de carbono na energia de impacto.



Fonte: Marques, L.F, (2011).

A boa correlação resistência mecânica-tenacidade encontrada em aços micro ligados é consequência da formação de granulação refinada associada à formação de precipitados finamente dispersos na matriz. Esses aços são muito utilizados pela indústria petrolífera. Nesses aços, os níveis de resistência mecânica e tenacidade são afetados pela combinação de uma micro estrutura refinada de ferrita e perlita (ou ferrita/martensita), e com o endurecimento por precipitação causado pela formação de carbeto V, Ti ou Nb finalmente dispersos na matriz da ferrita. Um endurecimento residual também pode ser conseguido em função do processamento termomecânico que promove uma textura anisotrópica no material (OLIVEIRA,2014).

2.1.3 Influência de elementos de liga

A adição de elementos de liga é justificada, pois muitas vezes pequenos acréscimos de determinados componentes causam significativa melhora nas propriedades dos aços. As características que levam ao emprego de tais elementos de liga são (SILVA e MEI,2010):

- **Carbono (C):** é o mais importante devido à necessidade de haver carbonetos na estrutura para conferir a dureza e a resistência necessária à aplicação. Geralmente o teor de carbono é elevado, situando-se entre 0,8 e 2%. Quando tenacidade é um fator

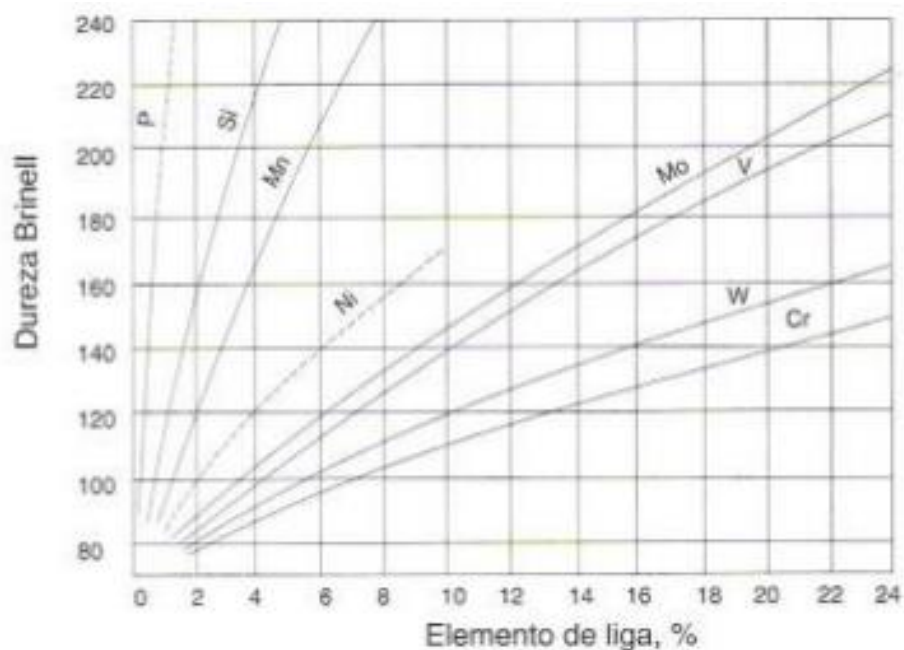
importante para a aplicação (tais como martelos e talheres devido aos esforços de impacto), emprega-se teores de carbono baixo.

- **Silício (Si):** tem função desoxidante na fabricação do aço. Normalmente situa-se entre 0,10 e 0,30%, pois teores mais elevados tendem a favorecer a grafitação. Em alguns poucos casos (aços resistentes ao choque) emprega-se silício elevado (1% ou 2%) para fins de aumento de temperabilidade e aumento da resistência ao revenido sem que haja abaixamento da linha MS (que favoreceria a formação de austenita retida).
- **Cromo (Cr):** é o elemento adicionado com a função principal de elevar a temperabilidade, pois é o que apresenta melhor relação custo/benefício. Além disso o cromo forma carbonetos endurecedores que são facilmente solúveis no tratamento de austenitização que precede a tempera. O efeito de aumento de temperabilidade pelo cromo geralmente é máximo para teores de 4%Cr, sendo este o valor tipicamente empregado em aços ferramentas para trabalho a quente e em aços rápidos. No caso de aços para trabalho a frio, o teor de cromo pode atingir 12% quando se deseja dureza elevada. Neste caso o teor de cromo é mais elevado para fins de gerar maior quantidade de carbonetos de cromo na matriz (o teor de carbono situa-se, então, em cerca de 2%C). Em teores acima de 4% o cromo tem ainda o efeito de elevar a resistência a quente por aumentar a resistência à oxidação e contribuir para a formação do pico de dureza secundária.
- **Vanádio (V):** atua como forte desoxidante (geralmente empregado em teores até 0,5%). O vanádio tem forte efeito sobre a temperabilidade quando dissolvido na austenita. Entretanto a sua função principal é a de atuar como estabilizador de grão, pois o seu respectivo carboneto é de difícil solubilização na austenita no tratamento de têmpera, evitando que haja o crescimento da mesma. Em aços rápidos (devido ao emprego de corte a quente), o teor de vanádio situa-se entre 1 e 2%.
- **Molibdênio (Mo):** tem efeitos similares ao tungstênio, tendo sido usada para substituí-lo. O custo do molibdênio é maior, porém a quantidade empregada é menor (normalmente o teor de molibdênio substitui duas vezes a quantidade de tungstênio).
- **Níquel (Ni):** Aumenta a resistência a corrosão, a tenacidade e a resistência mecânica.
- **Cobre (Cu):** Aumenta a resistência a corrosão atmosférica, aumenta a resistência a fadiga, por outro lado, reduz sensivelmente a soldabilidade, ductilidade e a tenacidade do aço.

- **Enxofre (S):** É bastante prejudicial aos aços, pois desfavorece a ductilidade, especialmente o dobramento transversal, e diminui a soldabilidade.
- **Manganês (Mn):** Eleva a resistência mecânica de uma forma segura, pois atua na resistência à fadiga e no limite de escoamento. Desfavorece a soldagem, entretanto é menos prejudicial que o carbono. É muito usado nos aços comerciais.

Na Figura 7 é possível observar o comportamento da dureza em relação alguns elementos de ligas.

Figura 7 - Elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a sua dureza.



Fonte: Lino (2017).

2.2 AÇO API 5CT GRAU N80Q

2.2.1 Norma API

O API foi constituído em 1919 como uma organização de estabelecimento de normas e é líder global em reunir especialistas no assunto em todos os segmentos para estabelecer, manter e distribuir normas de consenso para o setor de petróleo e gás. Nos primeiros 100 anos, o API desenvolveu mais de 700 normas para aprimorar a segurança operacional, a proteção ambiental e a sustentabilidade em todo o setor, principalmente com a adoção mundial dessas normas (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Os Tubos API 5CT têm aplicação na perfuração e na extração de poços de petróleo e gás e podem ser classificados nos três tipos listados a seguir (FREIAS, 2007):

- **Tubos de perfuração (*drilling*):** são utilizados para a perfuração de poços;
- **Tubos de revestimento (*casing*):** são inseridos nas perfurações e assentados com cimento;
- **Tubos de produção (*tubing*):** são tubos posicionados dentro dos tubos de revestimento e utilizados para a extração de óleo e gás. Também são utilizados no transporte de fluidos hidráulicos para o acionamento de equipamentos.

2.2.2 Composição química conforme API

Aços de alta resistência e baixa liga como os aços API, possuem um elevado refino de grão e pureza. Estes aços são caracterizados pelo reduzido teor de S e valores baixos de impurezas de segunda fase, como inclusões e óxidos (GOUVEIA, RODRIGUES e MARTINS,2011).

Na Tabela 1, observa-se os limites impostos pela norma API 5CT em relação aos elementos químicos de cada grau.

Tabela 1 - Composição química em fração mássica [%].

Grupo	Grau	Tipo	C		Mn		Mo		Cr		Ni	Cu	P	S	Si
			min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	H40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	J55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	K55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	N80	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	N80	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	M65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	L80	1	—	0,43	—	1,9	—	—	—	—	0,25	0,35	0,03	0,03	0,45
	L80	9Cr	—	0,15	0,3	0,6	0,9	1,1	8	10	0,5	0,25	0,02	0,01	1
	L80	13Cr	0,15	0,22	0,25	1	—	—	12	14	0,5	0,25	0,02	0,01	1
	C90	1	—	0,35	—	1,2	0,25	0,85	—	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—
2	C90	2	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,01	—
	C95	—	—	0,45	—	1,9	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	0,45
	T95	1	—	0,35	—	1,2	0,25	0,85	0,4	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—
	T95	2	—	0,5	—	1,9	—	—	—	—	0,99	—	0,03	0,01	—
	P110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
3	Q125	1	—	0,35	1,35	—	0,85	—	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—	—
	Q125	2	—	0,35	—	1	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,02	0,02	—
	Q125	3	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,01	—
	Q125	4	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,02	—
	Q125	4	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,02	—

Fonte: Adaptado da American Petroleum Institute (2010).

No geral, a norma é bastante tolerante quanto a composição em massa de cada elemento de liga, abrindo espaço para as indústrias produzirem seus tubos de acordo com suas necessidades e atendendo as exigências de cada grau referente a sua composição química (MELO,2013).

2.2.3 Propriedades mecânicas conforme API

Os requisitos referentes às propriedades mecânicas especificados pela norma (dureza e tenacidade ao impacto), como mostrado nas Tabelas 2 e 3, são mais rigorosas e exigentes que o tolerado pela norma na composição química mostrada (GODOI,2021).

Tabela 2 - Especificações de dureza.

Grupo	Grau	Tipo	Alongamento total sob carga (ϵ)	Limite de escoamento (σ_e) [Mpa]		Limite de resistência (σ_r) (min.)	Dureza (máx.)		Espessura de parede	Variação de dureza permitida
			[%]	min.	máx.	[Mpa]	[HRC]	[HBR]	[mm]	[HRC]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	H40	—	0,5	276	552	414	—	—	—	—
	J55	—	0,5	379	552	517	—	—	—	—
	K55	—	0,5	379	552	655	—	—	—	—
	N80	1	0,5	552	758	689	—	—	—	—
	N80	Q	0,5	552	758	689	—	—	—	—

Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Tabela 3 - Especificação de energia mínima absorvida Charpy (a 0°C).

Grau	Energia absorvida mínima para ensaio transversal	Energia absorvida mínima para ensaio longitudinal
	[J]	[J]
N80Q, L80, C90, C95, T95	19	27
P110	20	41

Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

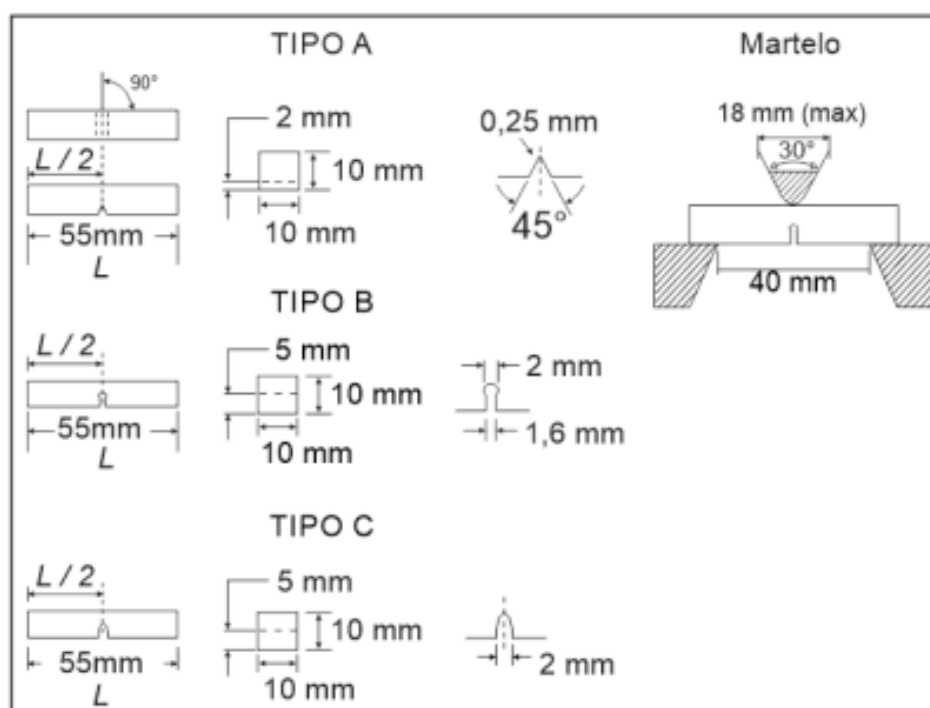
2.3 ENSAIO CHARPY-V

Os corpos de prova para ensaio de impacto Charpy são padronizados pela norma ASTM E-23, e são divididos em três tipos conforme a forma do seu entalhe. Assim, tem-se corpos de prova Charpy tipo A, onde o entalhe em forma de “V”, formando um ângulo de 45° e

profundidade de aproximadamente 2mm; tipo B, onde o entalhe cilíndrico é formado por um rasgo com um furo na extremidade, tem forma de um buraco da chave de fechadura; e tipo C, onde o entalhe tem a forma de “U”, com diâmetro de 2mm na ponta do entalhe e 5mm de profundidade, como pode ser observado na Figura 8 (SOUZA,1982).

Com essas condições padronizadas, a norma recomenda que a velocidade do martelo no momento do impacto fique entre 5 e 6 m/s. A parte que fará o choque com o corpo de prova é o cutelo, que deve possuir um ângulo de 30° e um raio de curvatura de 2mm a 2,5 mm. A distância entre apoios é de 40 mm, isso também pode ser observado na Figura 8 (GARCIA, SPIM e SANTOS, 2012).

Figura 8 - Corpos de prova Charpy, recomendados pela ASMT E-23 para ensaio de impacto.



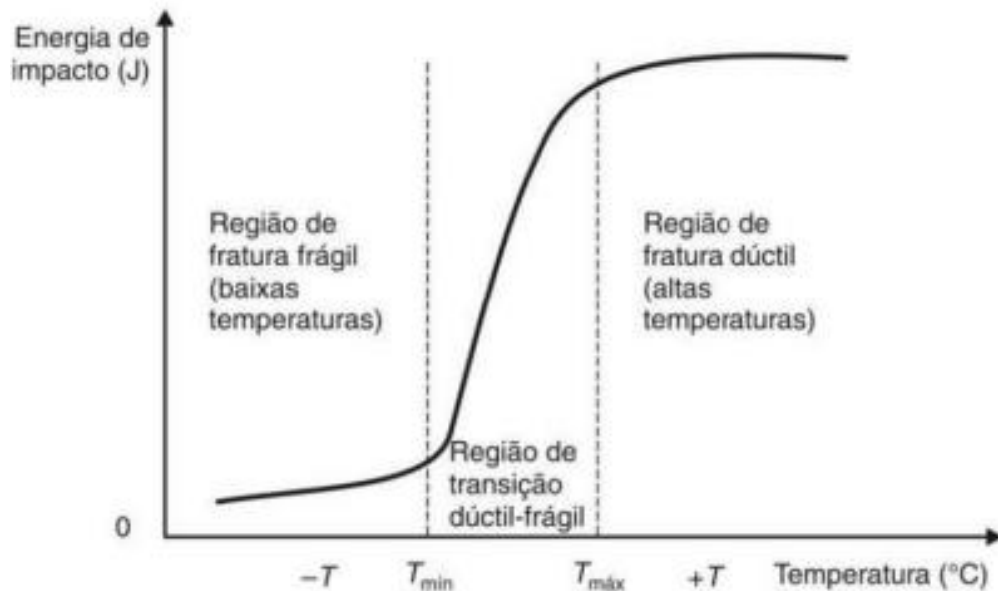
Fonte: Souza (1982).

Os corpos de prova tipo A são normalmente empregados para materiais de menor resistência, o tipo B para materiais de média resistência e tipo C para materiais de alta resistência (ALVES; TANIGUTI, 2011).

A principal função do ensaio Charpy consiste em determinar se um material possui ou não transição dúctil-frágil com a diminuição da temperatura, e caso presente, em que faixa de temperatura ocorre esta transição. A transição dúctil-frágil está relacionada entre a absorção da energia de impacto e a temperatura do material (CALLISTER,2015)

A temperatura de transição dúctil-frágil pode ser percebida entre -100 e $+100^{\circ}\text{C}$, dependendo da composição da liga e das condições de ensaio. A Figura 9 representa a curva de transição do material de dúctil para frágil em relação à temperatura (SHACKELFORD, 2008).

Figura 9 - Curva resposta de ensaio de impacto para transição da temperatura dúctil frágil.

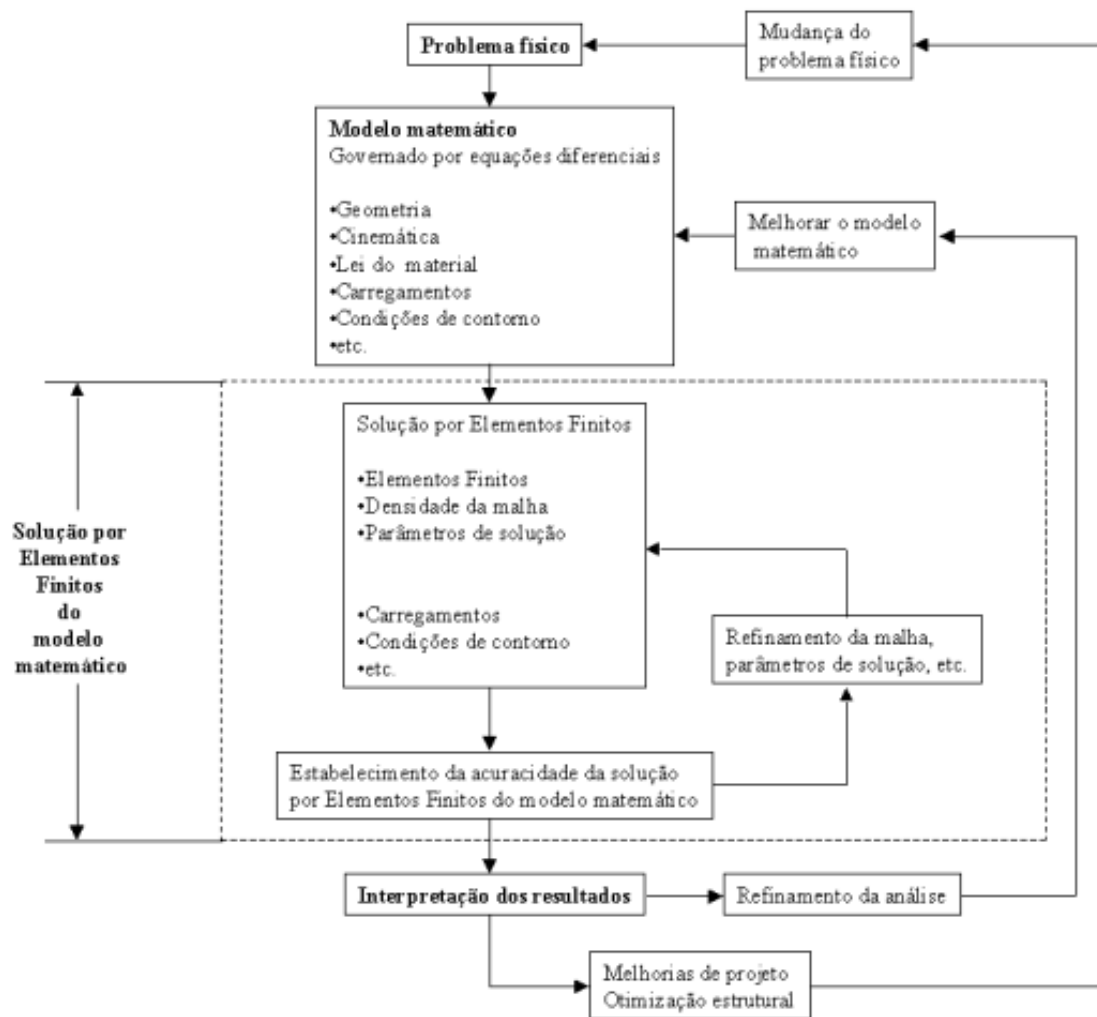


Fonte: Garcia, Spim e Santos (2012).

2.4 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Na Figura 10 é possível observar o fluxo de processos de um projeto que utiliza o método de elementos finitos, este processo contém toda a estrutura do projeto desde o início até o fim da cadeia de análise da metodologia por elementos finitos.

Figura 10 - Processo de análise por Elementos Finitos.



Fonte: Bathe (1996).

2.4.1 O método dos elementos finitos

Aqui será apresentado o exemplo mais simples e trivial possível do processo matemático para a análise de elementos finitos pelo método da rigidez direta. O conceito é fácil de entender nessa forma simples. A implementação deste método é matematicamente mais complexa que a descrita abaixo, aonde o processo de solução é intenso e exige a solução de grandes matrizes. Assim, a metodologia adotada aqui é ilustrativa para demonstrar o funcionamento do método dos elementos finitos.

A Figura 11 observa-se um diagrama de corpo livre do mais simples elemento finito estrutural, uma mola linear em uma dimensão. Ela tem uma rigidez característica (constante de

mola) $k_h = f/\Delta u$, de forma que um deslocamento cria uma força no nó. Assuma os deslocamentos positivos u_i e u_j e some as suas forças em cada nó (NORTON, 2013).

As equações (1) e (2) descrevem a força resultantes na mola descrita na Figura 11.

$$f_{ih} = k_h u_i - k_h u_j \quad (1)$$

$$f_{jh} = -k_h u_i + k_h u_j \quad (2)$$

Colocando as equações (1) e (2) na forma matricial, como demonstrado na equação (3):

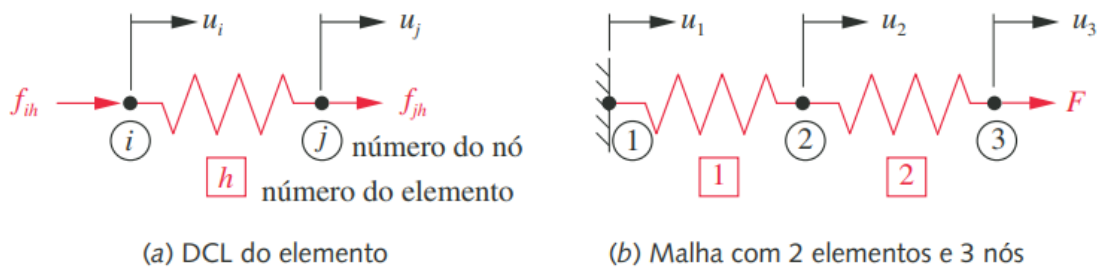
$$\begin{bmatrix} k_h & -k_h \\ -k_h & k_h \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{ih} \\ f_{jh} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

o que pode ser escrito, conforme equação (4), na notação matricial como

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (4)$$

onde k é a matriz de rigidez, d é o vetor de deslocamento nodal e f é o vetor de forças internas do elemento.

Figura 11 - Modelo e elemento simples de mola.



Fonte: Norton (2013).

Na Figura 11 – b observa-se dois desses simples elementos conectados entre si para formar uma malha de elementos finitos. O elemento 1 é fixo, o que cria uma condição de contorno de restrição (do movimento), e o elemento 2 tem em seu nó 3 uma força aplicada. Aplique a equação (1) nesses elementos e obtém-se as equações (5) e (6).

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{11} \\ f_{11} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{22} \\ f_{22} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

As forças na equação (5) e (6) são forças internas ao elemento e atuam nos nós. Para o equilíbrio, a soma das forças nodais deve ser igual às forças externas aplicadas aos nós. Deixe F_i representar a força externa em cada nó, onde i é o número que identifica o nó. Assim, somando as forças em cada nó:

$$\begin{aligned} \text{nó 1} \quad & f_{11} = F_1 \\ \text{nó 2} \quad & f_{21} + f_{22} = F_2 \\ \text{nó 3} \quad & f_{32} = F_3 \end{aligned} \tag{7}$$

Substitua as expressões para as forças internas nos nós das equações (5) e (6) na equação (7).

$$\begin{aligned} k_1 u_1 \quad & -k_1 u_2 \quad & = F_1 \\ -k_1 \quad & +(k_1 + k_2)u_2 \quad & -k_2 u_3 = F_2 \\ & -k_2 u_2 \quad & +k_2 u_3 = F_3 \end{aligned} \tag{8}$$

e coloque o resultado na forma matricial, obtém-se a equação (9):

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix} \tag{9}$$

Ou:

$$[K]\{D\} = \{F\} \tag{10}$$

As forças aplicadas e a matriz rigidez são conhecidas. Os deslocamentos nodais serão calculados, o que requer a pré multiplicação em ambos os lados pela inversão de $[K]$. Mas esta matriz $[K]$ é uma matriz singular, ou seja, ela não tem uma solução única. Isso acontece porque o sistema de equações (8), (9) e (10) tem um grau de liberdade cinemático e pode estar em equilíbrio em qualquer local de seu universo unidimensional. Ainda não foi levada em conta a restrição de movimento para o nó 1. Para resolver um problema de elementos finitos estático, devem-se remover todos os graus de liberdade cinemáticos utilizando as condições de contorno o deslocamento nulo do nó 1 (u_1). Isso zera a primeira coluna da matriz de rigidez, e o sistema agora tem três equações e duas incógnitas. Se a força de reação F_1 é conhecida, pode-se eliminar a primeira equação e utilizar as duas restantes para calcular os deslocamentos. Também, a partir da Figura 10 – b, pode-se observar que nenhuma força externa é aplicada ao nó 2, tornando F_2 nula. Substituindo, obtém-se a equação (11):

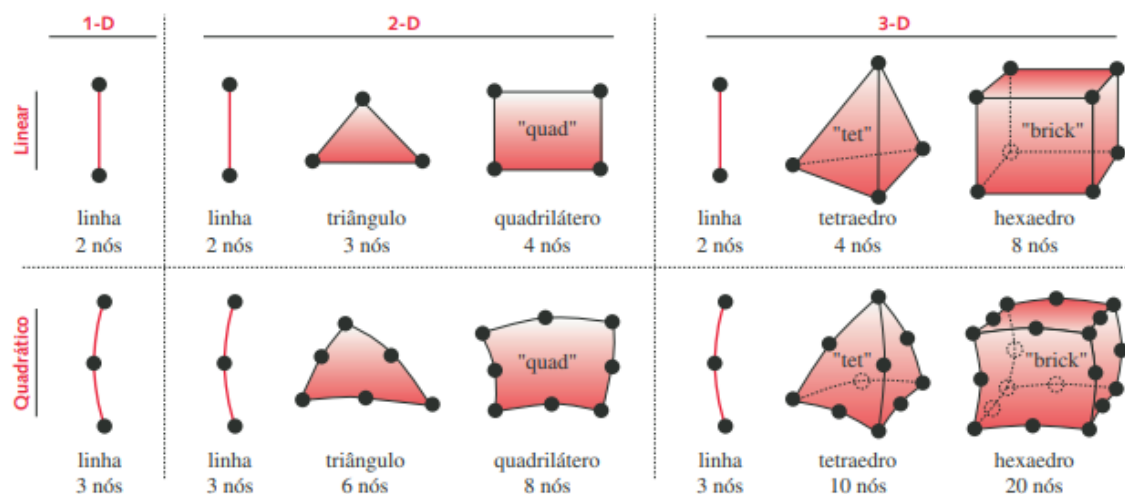
$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F \end{Bmatrix} \quad (11)$$

A matriz $[k]$ é chamada de matriz de rigidez reduzida e tem uma matriz inversa não singular, o que permite a solução para os deslocamentos desconhecidos. Após os deslocamentos terem sido encontrados, as forças internas em cada um dos nós podem ser calculadas pelas equações (5) e (6). As equações envolvendo as forças de reação desconhecidas, que foram removidas para reduzir a matriz, agora podem ser calculadas para determinar as forças de reação. As deformações são calculadas derivando os deslocamentos e as tensões são calculadas a partir dessas deformações e das propriedades do material. Muitos pós-processadores irão mostrar as tensões principais e as tensões equivalentes de von Mises, bem como as deformações e deslocamentos (NORTON,2013).

2.4.2 Tipos de elementos

Os elementos podem ser de uma, duas ou três dimensões ou, ainda, elementos de linha, área e volume, respectivamente. Eles também podem ser de diferentes “ordens”, termo que se refere à ordem da função (normalmente um polinômio) utilizada para interpolar o deslocamento no interior do elemento. Pode se observar na Figura 12 que alguns dos elementos mais comuns, agrupados por dimensionalidade e ordem. De um modo geral, pode-se usar o mais simples dos elementos que, ainda assim, se obterá a informação desejada, uma vez que elementos e ordens superiores implicam em um tempo computacional muito alto (NORTON, 2013)

Figura 12 - Alguns Elementos Finitos Comuns.



Fonte: Norton (2013).

Na Figura 12, os elementos mostrados são divididos em grupos com uma, duas e três dimensões, chamados de 1-D, 2-D e 3-D, respectivamente. Esses grupos dimensionais definem

quantos graus de liberdade (GDL) cada nó de um elemento tem. Note que o elemento de linha existe em todos os três grupos. Elementos de linha são adequados para modelar estruturas como membros de treliças e vigas com área de seção transversal constante, e podem ter 1,2,3 e 6 GDL em cada nó. Um elemento de linha 1-D tem dois GDL no total, em cada nó. Fisicamente, isso representa um elemento de treliça, conectado por pinos nas uniões com seus vizinhos. O elemento de linha pode apenas transmitir força ao longo do seu comprimento (unidimensional) e não pode suportar momento nos nós. Um elemento de linha 2-D tem 3 GDL por nó e pode representar uma viga 2-D, com momento e força em duas direções. Um elemento de linha 3-D tem 6GDL por nó e pode representar um eixo viga 3-D com momentos e torques em adição às forças lineares nas três direções. Elementos de geometria mais complexa, como triângulos, quadriláteros, tetraedros e hexaedros (cubo), tem mais GDL.

Observe que um elemento de linha 1-D pode apresentar bons resultados para um membro de treliça carregado axialmente em tração, mas não será capaz de prever com precisão a flambagem se a carga axial for compressiva. A flambagem deve ser verificada separadamente utilizando as expressões de Euler, Johnson ou da secante.

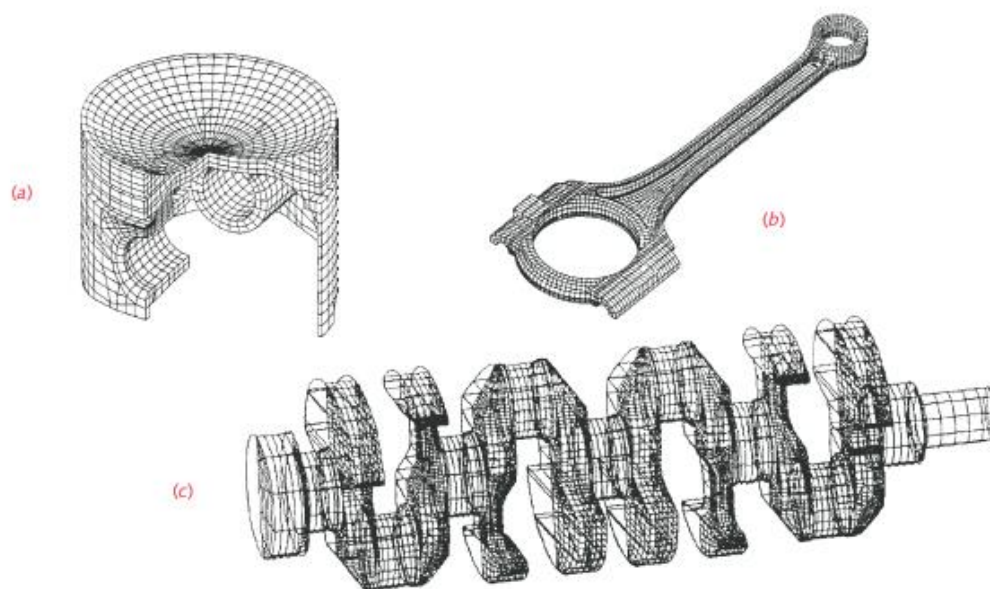
Elementos 2-D podem ser utilizados para modelar estruturais tridimensionais se sua geometria e seu carregamento criam um caso de tensão plana ou deformação plana no qual suas magnitudes são nulas na terceira dimensão. Uma viga longa com cargas simétricas de flexão ou axial, em relação à sua largura, pode ser analisada com elementos 2-D. Porém, se o carregamento é excêntrico, será necessário utilizar elementos 3-D. Para uma análise 2-D de uma viga ser válida, todos os planos longitudinais devem permanecer em seus planos originais quando a viga deflete.

Se um componente é axissimétrico e de parede fina, e o carregamento é simetricamente distribuído, como em um tubo ou vaso de pressão sujeitos a uma pressão interna, pode-se usar elementos de superfície 2-D(casca). Neste caso assume-se que o gradiente de tensão através da fina parede é pequeno o suficiente para ser ignorado. Estruturas não axissimétricas podem ser analisadas com elementos de casca desde que a espessura da sua parede seja pequena em comparação com a área da superfície.

Muitos componentes de máquinas tem a geometria e o carregamento de tal forma que requerem o uso de elementos 3-D. Caso a geometria seja simples, pode-se, então, resolver com os métodos clássicos. Na Figura 13 são demonstradas geometrias muito complexas para usar o

método clássico de forma precisa, o que é possível com o uso da análise por FEA 3-D (NORTON, 2013).

Figura 13 - Modelos de elementos finitos para pistão (a), biela (b) e virabrequim (c) de um motor.



Fonte: Norton (2013).

2.4.3 Malha

No início da utilização do FEA, a geração de malha para um componente exigia um enorme esforço. Atualmente, geradores automáticos de malha e pré-processadores presentes nos softwares comerciais tornam essa tarefa muito mais simples. Muitos aplicativos comerciais permitem a importação do modelo direto do CAD, além de autogerar a malha de elementos finitos (NORTON, 2013).

A maioria dos geradores de malha oferece, por padrão, quadriláteros lineares ou malha mista de quadriláteros e triângulos para as regiões onde a geometria da peça tenha uma maior complexidade. Alguns geradores de malha oferecem apenas malhas 3-D com elementos tetraédricos. Um software comercial de FEA oferecerá um pré-processador que permite a geração manual de malhas com elementos da sua escolha. Um resultado melhor na análise 3-D pode ser alcançado gerando uma malha que combina hexaedros de 8 nós e elementos prismáticos com 6 nós (*wedge*), ou aumentando a ordem dos elementos tetraédricos, embora isso aumente o tempo de processamento. À medida que os computadores se tornam mais rápidos, isso vem deixando de ser um problema (NORTON, 2013).

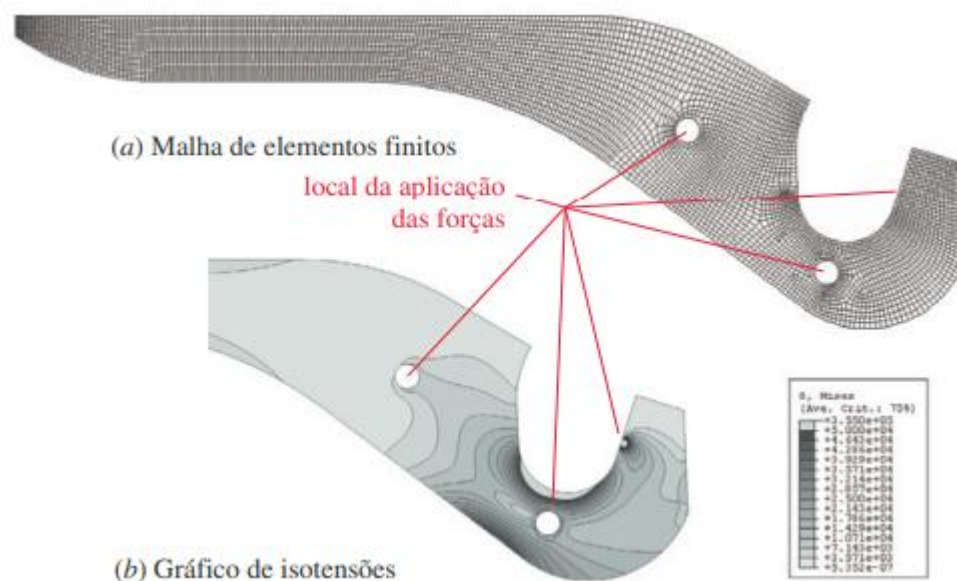
2.4.3.1 Densidade da malha

Uma malha maior é desejada quando se quer minimizar o tempo de processamento. Nas regiões da peça onde o gradiente de tensão é pequeno, mesmo uma malha grosseira fornece bons resultados, mas nas regiões onde o gradiente de tensão é alto, como em locais com concentrações de tensão, uma malha mais refinada é necessária para capturar a variação de tensão. Dessa forma, pode ser necessária variar a densidade da malha no modelo, processo chapado de refino da malha (NORTON, 2013).

2.4.3.2 Refino da malha

Uma malha mais grosseira pode ser aplicada inicialmente em um componente, mas o projetista ou analista deve usar conceitos de engenharia baseados na compreensão da distribuição de tensão em membros carregados para decidir se aquela região precisa ter uma malha mais fina. Na Figura 14 é possível observar um exemplo de malha em um modelo 2-D. Observe na figura (a) a concentração de elementos menores em torno do furo e no ponto de aplicação da força, na mandíbula. As concentrações de tensão nessas posições são visíveis no gráfico de tensões, figura (b). O refino da malha é necessário principalmente nas regiões de alta concentração de tensões (NORTON,2013).

Figura 14 - Análise de tensões por elementos finitos de um alicate de crimpagem.

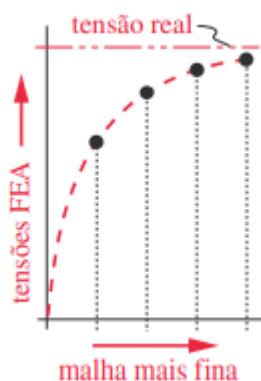


Fonte: Norton (2013).

2.4.3.3 Convergência

Como saber se uma malha foi suficiente refinada? A maneira usual é aplicar um teste de convergência. A partir de uma malha de certo tamanho, calculam-se as tensões. Nas regiões onde as tensões são maiores, aplica-se um fator de redução e gera-se uma nova malha, mais refinada, calculando-se novamente as tensões. Os valores de tensão nessas regiões são comparados para as diferentes densidades de malha. Se ocorrer uma diferença significativa entre uma solução e outra, isso indica que a malha anterior é ainda muito grosseira e deve ser refinada. Eventualmente, a mudança nos valores calculados para a tensão em malhas sucessivamente mais refinadas se tornará menor, indicando que a solução converge para o valor real. Se os resultados das diversas análises para a tensão em uma região específica foram expressos na forma de um gráfico, ele terá a aparência do gráfico da Figura 15. A curva tem crescimento exponencial e aproxima-se assintoticamente do valor real da tensão (NORTON,2013).

Figura 15 - Resultados do refino de malha.



Fonte: Norton (2013)

2.5 EFEITOS DINÂMICOS E TÉRMICOS

O regime de deformação plástica é um desafio para modelar, independente da escala, mas os efeitos dinâmicos e térmicos adicionam mais graus de dificuldade ao processo. Geralmente, é um conhecimento empírico que a taxa de deformação crescente causa um aumento do escoamento e do fluxo de tensão, embora os efeitos se tornem menos marcantes com o aumento da temperatura. À medida que a temperatura aumenta, a tensão de fluxo diminui. (CAMPBELL e FERGUSON, 1970).

O que causa as variações no comportamento pode ser melhor explicado micro mecanicamente. Como mencionado anteriormente, a deformação de um material é resultado do

deslocamento desigual do material. Assim, a quantidade de deformação que ocorre depende na taxa que deslocamentos podem mudar em um material. As seguintes equações são uma explicação do que se sabe até agora sobre como diferentes mecanismos afetam a velocidade das discordâncias, e, portanto, como isso afeta o comportamento da tensão de fluxo. Quando uma matriz de discordâncias começa a se mover, é criada uma tensão de cisalhamento interna, conforme descrito na equação (12) (MEYERS, 1994).

$$\dot{\gamma} = \rho b v \quad (12)$$

Onde, $\dot{\gamma}$ é a tensão de cisalhamento, ρ é a densidade de deslocamento, b é o vetor de Burgers, e v é a velocidade de deslocamento (CLIFTON, 1983).

A taxa de deformação por cisalhamento pode ser relacionada com a taxa de deformação plástica geral adicionando um fator M de orientação ao material, como observado na equação (13) (MAYERS; CHAWLA, 1984).

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{M} \rho b v \quad (13)$$

Assim, pode-se ver que a taxa de deformação experimentada no material é afetada pela velocidade dos deslocamentos. Mas o que controla a velocidade dos deslocamentos? Muitas relações foram desenvolvidas para a velocidade de deslocamento, algumas mais bem desenvolvidas que outras. Geralmente depende dos tipos de deslocamentos presentes (borda, parafuso), a estrutura do material, e as temperaturas internas. Mais especificamente, é o resultado de uma soma de contribuições de diferentes tipos de movimentos de deslocamento, nos quais alguns dominam diferentes regimes de taxas de deformação. Há três categorias de mecanismos de movimentação: movimento ativado termicamente, mecanismo de arrasto e efeitos relativistas (WUERTEMBERGER, 2016).

Ativação térmica pode ajudar os deslocamentos através de barreiras de curto alcance (obstáculos que um deslocamento pode encontrar ao longo do caminho, tais como florestas de deslocamentos, ângulos de soluto, pequenos ângulos de delimitação, outros deslocamentos, etc.), mas pode não ser suficiente para ultrapassar obstáculos de longo alcance. Devido a isto, os obstáculos podem ser classificados como aqueles de curto alcance que podem ser conquistados pelo movimento térmico (térmico) e os de longo alcance que não podem (atérmicos). A eficácia do movimento térmico é maior quando há mais vibração. Assim, em taxas de deformação mais elevadas onde há menos tempo para geração térmica, ativação térmica é menos eficaz na propulsão ao longo de deslocamentos (WUERTEMBERGER, 2016).

2.6 LEIS CONSTRUTIVAS E CRITÉRIOS DE DANOS

As leis construtivas são equações utilizadas para prever o comportamento de tensão-deformação dos materiais. Estas leis têm-se baseado em grande parte em leis experimentais, resultados obtidos a partir de testes mecânicos e teorias baseadas nestes testes. Diferentes leis constitutivas são usadas para descrever diferentes porções destas curvas. Por exemplo, são normalmente usadas leis separadas para descrever a porção elástica da curva, por oposição para a parte plástica da curva. Podem ser baseados modelos reológicos, ou com base mais fenomenologicamente no próprio material, onde os parâmetros do material são determinados e enquadrados nas leis constitutivas. Uma terceira opção final, são materiais baseados no relacionamento, onde as relações baseadas na microestrutura são trazidas para a mistura (LESAR, 2013).

Abordam-se leis constitutivas que preveem o stress do fluxo, mas não se-abordam os critérios de dano, que assinalam quando um material falhou e já não pode suportar cargas. A formulação do critério de dano é semelhante à das equações do modelo constitutivo. Podem ser fenomenológicas, baseadas em materiais, ou utilizar uma lei de falhas (Critério de Tensão de von Mises). Ambos são necessários para simular completamente uma situação em que um material é destruído. No próximo tópico abordar-se-á o modelo fenomenológico sugerido por Johnson-Cook, o qual será utilizado para a modelagem do ensaio Charpy-V (WUERTEMBERGER, 2016).

2.6.1 Equação do critério Johnson-Cook

O modelo constitutivo Johnson-Cook foi publicada em 1983 por Gordon Johnson e Willian Cook como uma empresa de investigação conjunta da Honeywell e da Força Aérea Americana. Na época, a modelagem computacional estava ganhando tração, mas ainda havia limitações nas suas capacidades devido à falta de modelos de danos constitutivos, particularmente para os altos impactos na velocidade e cenários de detonação. O objetivo era ser capaz de criar um modelo que funcionaria para um modelo que funcionaria para um amplo espectro de materiais, mas também não exigiria testes laboratoriais extensivos que seriam dispendiosos e demorados. Foram capazes de desenvolver este modelo que visava matérias sujeitos a grandes tensões, altas taxas de deformação e altas temperaturas que têm sido amplamente aceitas na indústria hoje em dia. O compromisso entre a precisão dos resultados e

a facilidade de utilização e sua ampla implementação durante a modelação torna-se uma opção atrativa (JOHNSON e COOK, 1983).

Diversos modelos empíricos e semiempíricos são atualmente utilizados para a determinação da plasticidade computacional e, segundo Hoge & Mukherjee, o modelo de Johnson-Cook é o mais comumente utilizado, apesar de ser puramente empírico. No entanto, não existe atualmente uma metodologia normalizada para calcular com precisão o modelo de Johnson-Cook, levando cada usuário a desenvolver seu próprio método. A equação (14) demonstrada, fornece a tensão do material, no modelo de Johnson-Cook, que descreve o comportamento plástico a altas taxas de deformação e altas temperaturas (ABM WEEK, 2019).

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0} \right)^m \right] \quad (14)$$

Onde σ é a tensão de von Mises ou tensão equivalente, A é a tensão de rendimento, B é o coeficiente de tensão do plástico, ε é a tensão plástica, n é o coeficiente de endurecimento da tensão, C é o coeficiente da taxa de deformação plástica, $\dot{\varepsilon}$ é taxa de deformação plástica, $\dot{\varepsilon}_0$ é um normalizador da taxa de deformação, e o m é o coeficiente térmico.

A equação de força (ou fluxo) dita o comportamento de tensão-deformação para além do limite elástico. O primeiro conjunto de parênteses são contribuições de estresse estático que produzem um comportamento de estresse e endurecimento por esforço (JOHNSON e COOK, 1983). É baseada na equação de Ludwicks (equação (15)):

$$\sigma_{flow} = \sigma_{yield} + B\varepsilon_p^n \quad (15)$$

A tensão de cisalhamento (σ_{flow}) é o estresse de pós-capacidade, σ_{yield} é a tensão de escoamento, B e n são os coeficientes de endurecimento (MEYERS, 1994; LUDWIK, 1909). Foi desenvolvido com base na observação experimental (BERSTROM, 2011).

O segundo conjunto de parênteses descreve o comportamento da taxa de deformação. Baseia-se num modelo logarítmico simples proposto por Ludwik e utilizado por Lindholm, descrita pela equação (16) (LINDHOLM, 1964).

$$\sigma = \sigma_{yield} (1 + C \log \dot{\varepsilon}_p) \quad (16)$$

O terceiro conjunto de parênteses escreve os efeitos da temperatura, onde o aumento da temperatura provoca a diminuição do estresse do fluxo. A temperatura homóloga é utilizada para normalizar a temperatura do material em relação a uma temperatura de referência. As

contribuições térmicas são bastante importantes para a investigação da *Air Force Institute of Technology (AFIT)* desde o evento do desgaste do trenó de foguete sendo modelado experimentalmente flutuações extremas de temperatura. Além disso, permite que o modelo inclua os efeitos do calor gerado internamente pela deformação do processo. Os autores notaram que é mais provável que os três comportamentos (estresse estático, tensão e temperatura) estão mais interrelacionados do que a forma como o modelo está atualmente formulado, mas demonstrou dar uma previsão razoavelmente exata para o meio-baixo impactos da taxa de deformação do material (MEYERS,1994; HAMMER,2012; ZUKAS,1990).

2.6.2 Critério de falha de Johnson-Cook

A equação de fluxo dita o comportamento de tensão-deformação de um material para além de um material para além do limite elástico, mas não faz nada para prever quando o material irá falhar. Por esta razão, é necessário um critério de dano para assinalar em que ponto a fratura irá ocorrer. Dois anos após a publicação da sua equação de força, Johnson e Cook publicaram um modelo de fratura, ainda orientado para alta velocidade, impactos de alta taxa de deformação e a criação de um modelo completo. Johnson e Cook estavam interessadas em assegurar-se de que as propriedades estáticas dos materiais foram aumentadas por propriedades térmicas dos materiais. Em particular, a parte térmica tinha sido negligenciada em modelos anteriores, por isso a combinação dos três componentes (falha estática, efeitos da taxa de deformação e temperatura) foi um passo em frente para a modelação dinâmica (WUERTEMBERGER, 2016).

O critério de Johnson-Cook é demonstrado na equação (17):

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon^p}{\epsilon_f} \quad (17)$$

Onde D , é o dano acumulado, $\Delta \epsilon^p$ é um incremento equivalente a tensão plástica acumulada, e ϵ_f é a tensão equivalente a tensão de fratura, taxa de tensão, e a condição de temperatura. Uma vez que os danos se acumulam ao ponto em que o valor de D é igual a 1, ocorreu uma falha do material. O critério é baseado no cálculo de uma tensão de falha crítica, conforme demonstrada na equação (18) (JOHNSON e COOK, 1985).

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 e^{-D_3 Q}] \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right] [1 + D_5 T^*] \quad (18)$$

onde ϵ_f é a tensão equivalente na falha, $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ e $D5$ são todos coeficientes determinados experimentalmente e Q é o fator de triaxilidade. O fator de triaxilidade é a razão entre a tensão média e a tensão equivalente, que flutua ao longo da deformação. Serve como uma medida de ductilidade, descrita na equação (19).

$$Q = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}_{eq}} \quad (19)$$

onde σ_m é a tensão média, e $\bar{\sigma}_{eq}$ é a tensão equivalente de von Mises. A tensão é definida como a média das três principais tensões, conforme equação (20):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} \quad (20)$$

onde σ_{11} e σ_{22} e σ_{33} , são as tensões equivalentes, ou Tensão de von Mises (equação (20)):

$$\bar{\sigma}_{eq} = \sqrt{\frac{3\sigma_{ij}'\sigma_{ij}'}{2}} \quad (21)$$

onde σ_{ij} é um vetor de tensão, denotando todas as direções de tensões de cisalhamento e normal (equação (21)).

σ_m está apenas levando o estresse por mudança de volume, mas negligencia os estresses causados por efeitos de distorção. Está sendo comparado diretamente com o estresse de von Mises que é derivado da tensão provocada pela distorção. Portanto, o coeficiente de triaxilidade está diretamente relacionado as tensões causadas por mudanças de volume para aqueles provocados por mudanças de distorção (AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION, 1985)

Pode-se fazer uma observação com base na formulação de Q : quando um problema é uniaxial, todos os tensores de tensão exceto σ_{11} se cancelam, deixando um valor de Q constante. Assim, unidimensionalmente, a deformação equivalente na fratura é igual a deformação de ruptura. No entanto, para todos os outros casos, os dois não são necessariamente iguais (WUERTEMBERGER, 2016).

Deve-se notar que no desenvolvimento original de Johnson-Cook, D_3Q é realmente um termo positivo na equação (17). Além disso, Johnson e Cook observaram que esta equação é válida apenas para valores de triaxilidade de 1,5 ($Q \leq 1,5$). Além disso, uma equação diferente deve ser usada (JOHNSON e COOK, 1985).

Como um evento dinâmico está ocorrendo ao longo da deformação plástica, o dano será acumulado. O valor D é uma tentativa de rastrear o acúmulo lento de danos, enquanto que constantemente se atualiza um valor de deformação crítica onde a falha ocorrerá. Uma vez que a tensão de dano acumula e a tensão equivalente calculada na fratura correspondente a um valor, o programa de simulação é alertado de que o material falhou e é removido da simulação de alguma forma. Em simulações, o elemento com falha em um modelo de elementos finitos é definido e é eliminado, definindo os tensores de tensão igual a zero (JOHNSON e COOK, 1985).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

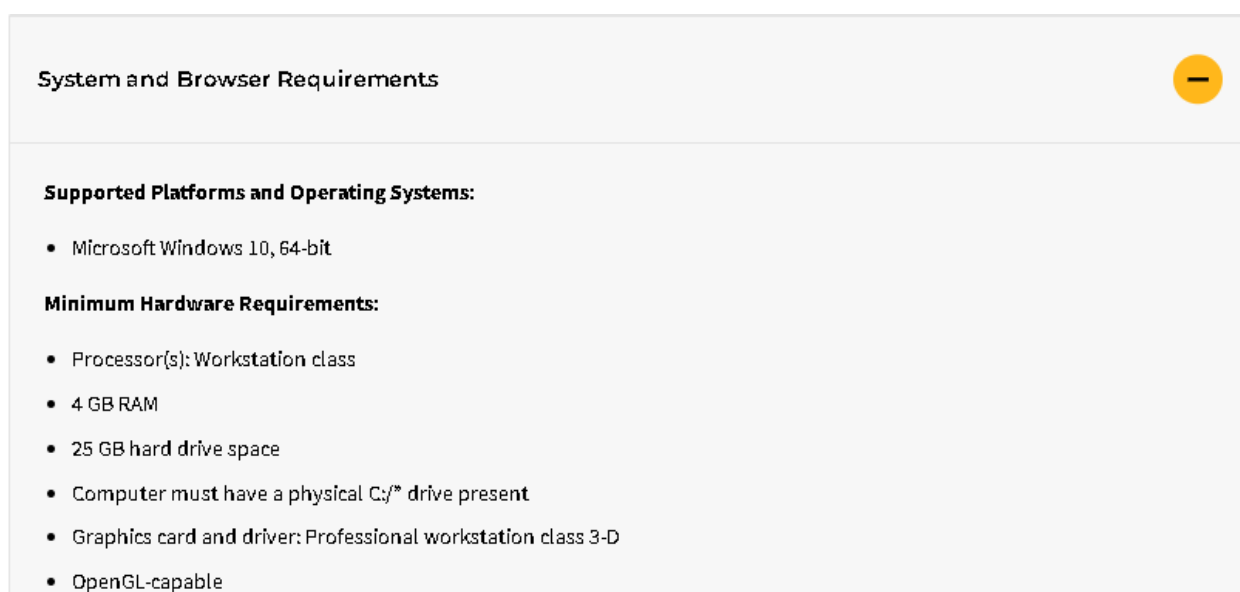
3.1.1 Software e tipo de análise

O software selecionado para realizarmos o desenvolvimento deste trabalho foi o Ansys 2022; tal software foi escolhido, pois o mesmo possui uma interface de fácil interação e a metodologia de análise dinâmica explícita.

Tal método é necessário, pois durante o impacto do martelo com o corpo de prova, o impacto ocorre em uma alta velocidade, a interação entre os dois materiais é de curta duração e ocorre a falha do material. Devido a tais fatores a simulação precisa ser feita utilizando este método de análise.

Outro fator que interfere diretamente na seleção do software é requisito do sistema, que o Ansys exige do computador, conforme a Figura 16.

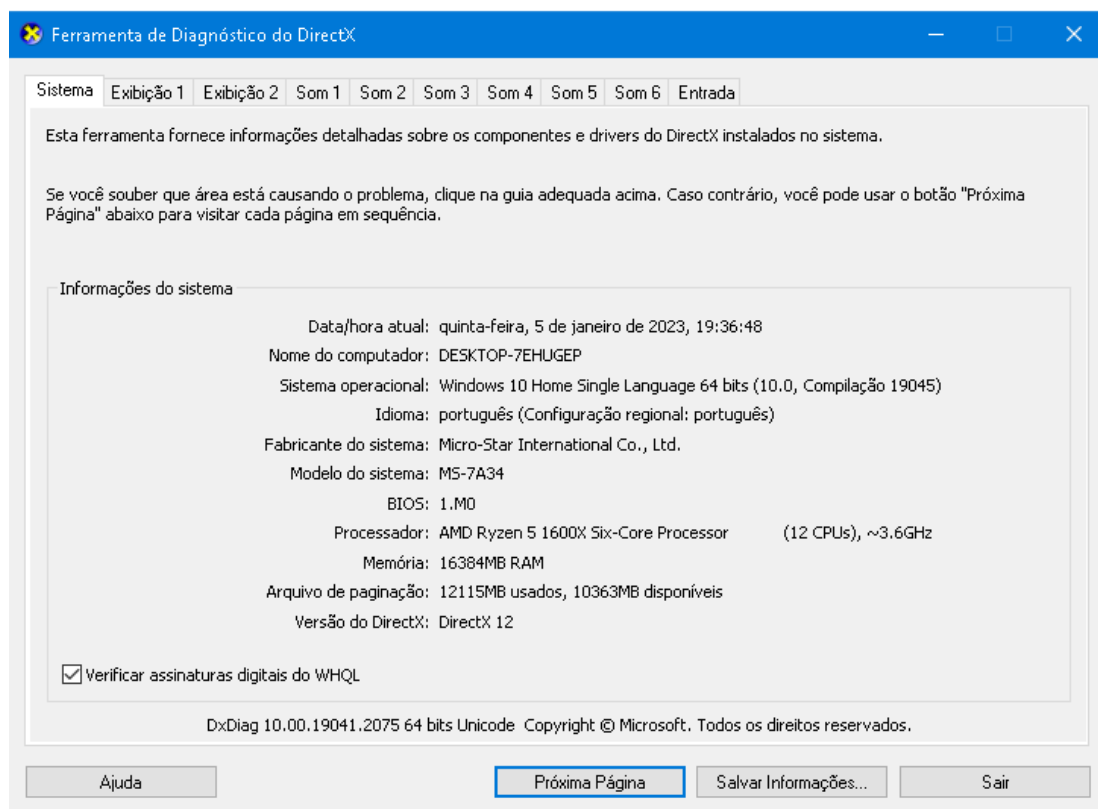
Figura 16 - Configuração Recomendada pela Ansys.



Fonte: Adaptado pelo autor (Ansys).

Assim é possível comparar com a configuração do computador utilizado para realização das simulações, e como se pode observar na Figura 17 as configurações atendem as recomendadas pela Ansys.

Figura 17 - Informações do Computador utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Definição do material

O material a ser estudado é o aço API 5CT N80 tipo Q, porém foi necessário fazer algumas alterações tendo em vista que não é possível ter todos os dados necessários para realizar a simulação, principalmente pelo fato de que o software se utiliza da metodologia de Johnson-Cook para realizar simulações dinâmicas. Assim foi necessário adotar o método de carbono equivalente, aonde foi selecionado um material que tenha a mesma quantidade de carbono encontrada no aço API 5CT N80 tipo Q, assim o material selecionado foi o aço SAE 4130 por apresentar um teor de carbono equivalente. Na Tabela 4, observa-se que a comparação entre os elementos de liga de ambos os materiais.

Tabela 4 - Elementos Aço 5CT N80 tipo Q e AÇO SAE 4130.

Elemento	Aço 5CT N80 tipo Q [%]	Aço SAE 4130[%]
C	0,3010	0,23-0,33
S	0,0030	<=0,040
P	0,0280	<=0,035
Si	0,2500	0,15-0,30
Mn	1,3700	0,4-0,6
Cr	0,0180	0,8-1,10
Ni	<0,0230	-
Mo	0,0025	0,15-0,25
Al	0,0300	-
Cu	0,0800	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além do fator carbono ambos possuem um limite de escoamento similar, como indicado na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Aço 5CT N80 tipo Q e Aço SAE 4130.

Material	Alongamento total sob carga (ϵ) [%]	Limite de escoamento (σ_e) [MPa]	Limite de resistência (σ_r) [MPa]
Aço 5CT N80 tipo Q	0,5	552 – 758	689
Aço SAE 4130	20	740	850

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2.1 Constantes de Johnson-Cook

Como o objetivo deste trabalho não foi a determinação das variáveis de Johnson-Cook e como descrito anteriormente estas variáveis são experimentais e possuem várias metodologias para sua obtenção, como determinado por Wuertemberger (2016), as Tabelas 6 e 7 contêm todas as variáveis necessárias para a realização da simulação.

Tabela 6 - Valores das variáveis de Johnson-Cook.

Coeficiente de Tensão		Coeficiente de Dano	
A	673 MPa	D_1	-0,1895
B	190 MPa	D_2	0,7324
n	0,1538	D_3	0,6633
C	0,017	D_4	0,0291
m	1,07	D_5	0,7162

Fonte: Adaptado de Wuertemberger,2016.

Tabela 7 - Propriedades Mecânica, Elástica e Térmica do Aço SAE 4130.

Propriedade	Símbolo	Valor
Densidade	ρ	7850 kg/m ³
Coeficiente de Poisson	ν	0,29
Modulo de Elasticidade	E	160GPa
Calor Especifico	c_p	523 J/kg°C
Fração de Calor Inelástica	β	0,9
Ponto de fusão	T_f	1432 °C

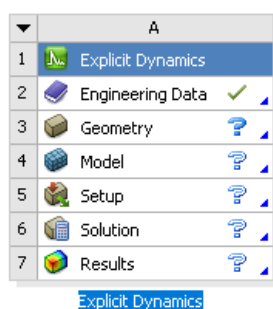
Fonte: Wuertemberger,2016

Assim é possível substituir as variáveis acima nas equações (14) e (18), respectivamente, para a geração da curva de Tensão x Deformação; tal curva foi gerada automaticamente pelo software Ansys.

3.2 MÉTODOS

O fluxo de trabalho foi feito se baseando no modelo gerado pelo próprio Ansys, sendo a base para montar a metodologia deste trabalho. O fluxo de processos gerado pelo Ansys foi montado conforme a Figura 18, retirada do Workspace do software.

Figura 18 - Fluxo de Processos gerado pelo Ansys.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 18, o processo consiste no seguinte fluxo:

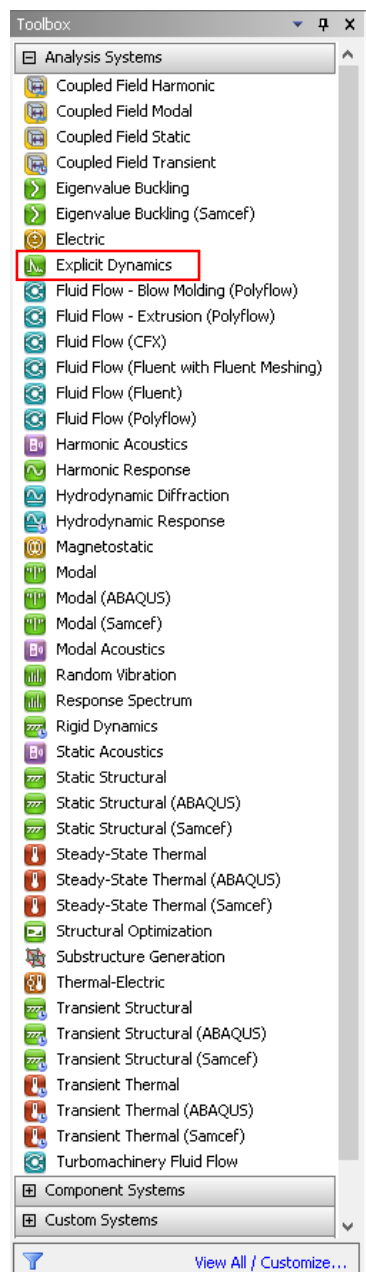
- 1- Setup tipo de análise;
- 2- Setup do material e suas propriedades;
- 3- Modelagem das geometrias envolvidas no ensaio;
- 4- Setup de parâmetros do modelo;
- 5- Definição das cargas e apoios da simulação;
- 6- Solução da simulação;
- 7- Resultados da simulação.

Os próximos itens deste trabalho iram descrever de uma maneira mais profunda como cada uma das etapas do fluxo de trabalho gerado foi trabalhada, uma importante ressalva é a similaridade do fluxo gerado pelo Ansys com o fluxo descrito na Figura 10 e assim como descrito na Figura 10 foi preciso um retrabalho, no caso deste fluxo os itens 3 e 4 foram retrabalhados constantemente durante o processo para se otimizar e gerar uma solução ótima do trabalho. Ou seja, a geometria do entalhe e o nível de refinamento da malha foram simulados em diferentes cenários para a obtenção de melhores resultados.

3.2.1 Setup do tipo de análise

Conforme dito anteriormente este foi o primeiro passo para iniciar a simulação em um software de elementos finitos. Na Figura 19 podemos ver todas as opções de tipos de análise existentes dentro do Ansys.

Figura 19 - Tipos de Análises.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentro da aba *Toolbox* > *Analysis Systems*, ficam todos os tipos de análise dentro do software. Na Figura 19, contornado em vermelho é possível ver o *Explicit Dynamics*, que é o tipo de análise utilizada para simular o ensaio *Charpy-V*.

Este tipo de análise é comumente utilizado para simular como um determinado objeto se comporta em cenários de queda livre ou de alta velocidade, tendo isso em vista, e pelos fatores citados anteriormente este foi o tipo de análise selecionado para realizar a simulação deste trabalho.

3.2.2 Setup do material e a suas propriedades

Dentro da aba de Setup do material dentro do software, foi necessário configurar os materiais utilizados dentro da simulação do ensaio. Conforme descrito anteriormente, foi necessário utilizar as propriedades do Aço SAE 4130 para a simulação. Como descrito anteriormente, o modo *Explicit Dynamics* simula o comportamento do material durante a situação de impacto e devido a este fator, o software necessita simular o comportamento do material sobre este impacto. Por este fator foi preciso utilizar os coeficientes de Johnson-Cook, conforme observado na Figura 22.

Figura 20 - Propriedades do corpo de prova.

Outline of Schematic A2: Aço ABNT 4130				
	A	B	C	D
1	Contents of Aço ABNT 4130		Source	Description
2	Material			
3	Martelo		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
4	STEEL 4130 JC		Exp	Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson + Cook
5	Structural Steel		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 4: STEEL 4130 JC				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Specific Heat Constant Pressure, C _p	523	J kg ⁻¹ C ⁻¹	
5	Johnson Cook Strength			
6	Strain Rate Correction	First-Order		
7	Initial Yield Stress	6,73E+08	Pa	
8	Hardening Constant	1,9E+08	Pa	
9	Hardening Exponent	0,1538		
10	Strain Rate Constant	0,017		
11	Thermal Softening Exponent	1,07		
12	Melting Temperature	1432	C	
13	Reference Strain Rate (/sec)	1		
14	Bulk Modulus	1,4E+11	Pa	
15	Shear Modulus	8E+10	Pa	
16	Johnson Cook Failure			
17	Damage Constant D1	-0,1895		
18	Damage Constant D2	0,7324		
19	Damage Constant D3	0,6633		
20	Damage Constant D4	0,0291		
21	Damage Constant D5	0,7162		
22	Melting Temperature	1432	C	
23	Reference Strain Rate (/sec)	1		

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso foi necessário criar três materiais dentro da biblioteca do Ansys, sendo que dois materiais foram aproveitados da sua biblioteca, enquanto que o material do estudo foi criado dentro da biblioteca, nas Figuras 20, 21 e 22, pode-se observar as propriedades dos materiais.

Figura 21 - Propriedades do Martelo.

Outline of Schematic A2: Apo ABNT 4130				
	A	B	C	D
1	Contents of Apo ABNT 4130		Source	Description
2	Material			
3	Martelo		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table S-110.1
4	STEEL 4130 JC		Exp	Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson + Cook
5	Structural Steel		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table S-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: Martelo				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	E
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Propriedades dos suportes do corpo de prova.

Outline of Schematic A2: Apo ABNT 4130				
	A	B	C	D
1	Contents of Apo ABNT 4130		Source	Description
2	Material			
3	Martelo		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table S-110.1
4	STEEL 4130 JC		Exp	Engng. Frac. Mech. Vol 21. No. 1. pp 31-48. 1985 Johnson + Cook
5	Structural Steel		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table S-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 5: Structural Steel				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	E
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	7850	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
6	Young's Modulus	2E+11	Pa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa	
10	Specific Heat Constant Pressure, C _p	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹	

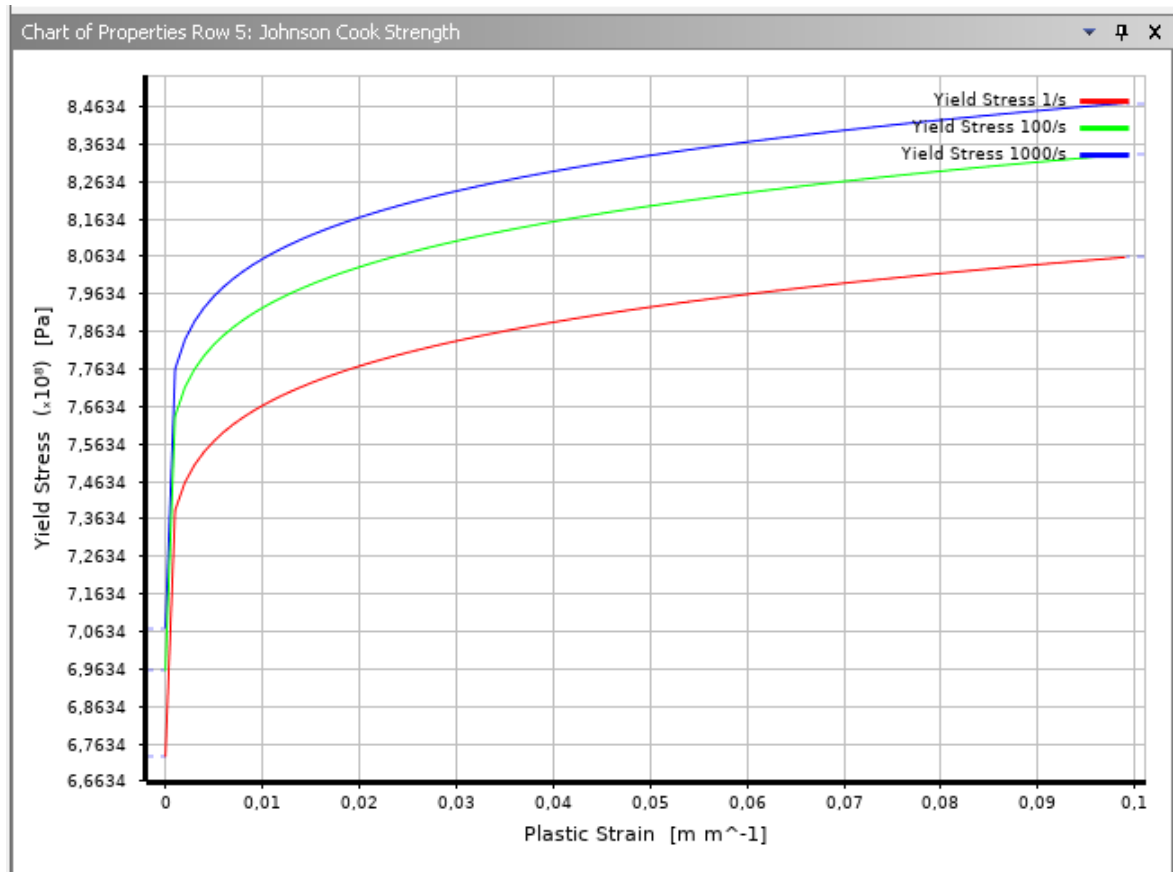
Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 20 e 21 representam os dois materiais utilizados no martelo e no suporte do corpo de prova, respectivamente. Estes materiais são genéricos, pois eles não são alvo do nosso estudo e por isso possuem propriedades que não afetam o mesmo.

Na Figura 22 é possível ver que as propriedades atribuídas ao material já são condizentes com a realidade e foi nesta etapa que as propriedades da Tabela 5, 6 e 7 foram colocadas.

Conforme as constantes de Johnson-Cook foram imputadas no software, o próprio Ansys gerou a curva de tensão x deformação do material, conforme indicado na Figura 23.

Figura 23 - Tensão x Deformação SAE 4130 Johnson-Cook.

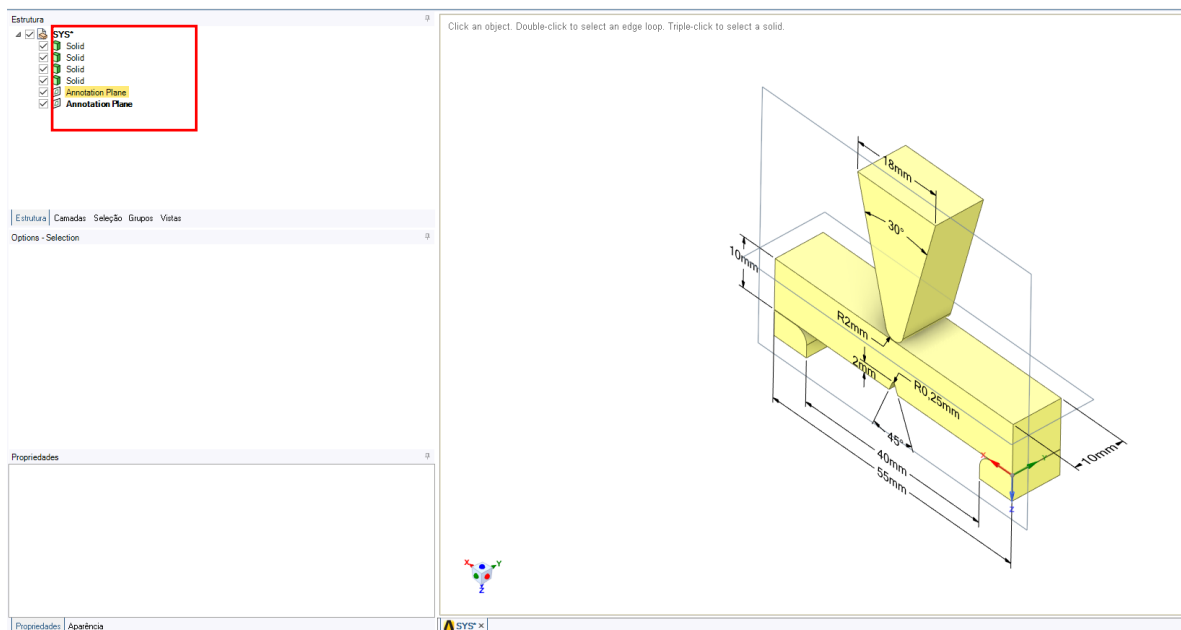


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Modelagem das geometrias envolvidas no ensaio

Foi durante esta etapa que foi modelado dentro do software os seguintes itens: Martelo, corpo de prova Charpy-V e os apoios do corpo de prova.

Figura 24 - Desenho do conjunto ensaiado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 24, é possível observar o desenho do conjunto corpo de prova Charpy-V, martelo e suporte do corpo de prova. As cotas em preto representam todas as cotas que devem respeitar a norma, conforme a Figura 8. Foi a partir desta etapa que algumas simplificações foram necessárias, para poder salvar, o processamento, ou seja, para que o computador não tenha que simular partes que não agregam valor para o ensaio.

Por este motivo, tanto os apoios quanto o martelo foram simplificados para que o computador focasse apenas no que fosse necessário e diminuísse o tempo de processamento.

Vale notar que foram realizados testes sem o raio de 0,25 mm no entalhe do corpo de prova, para que se pudesse criar um modelo base inicial e verificar o efeito do raio no corpo de prova.

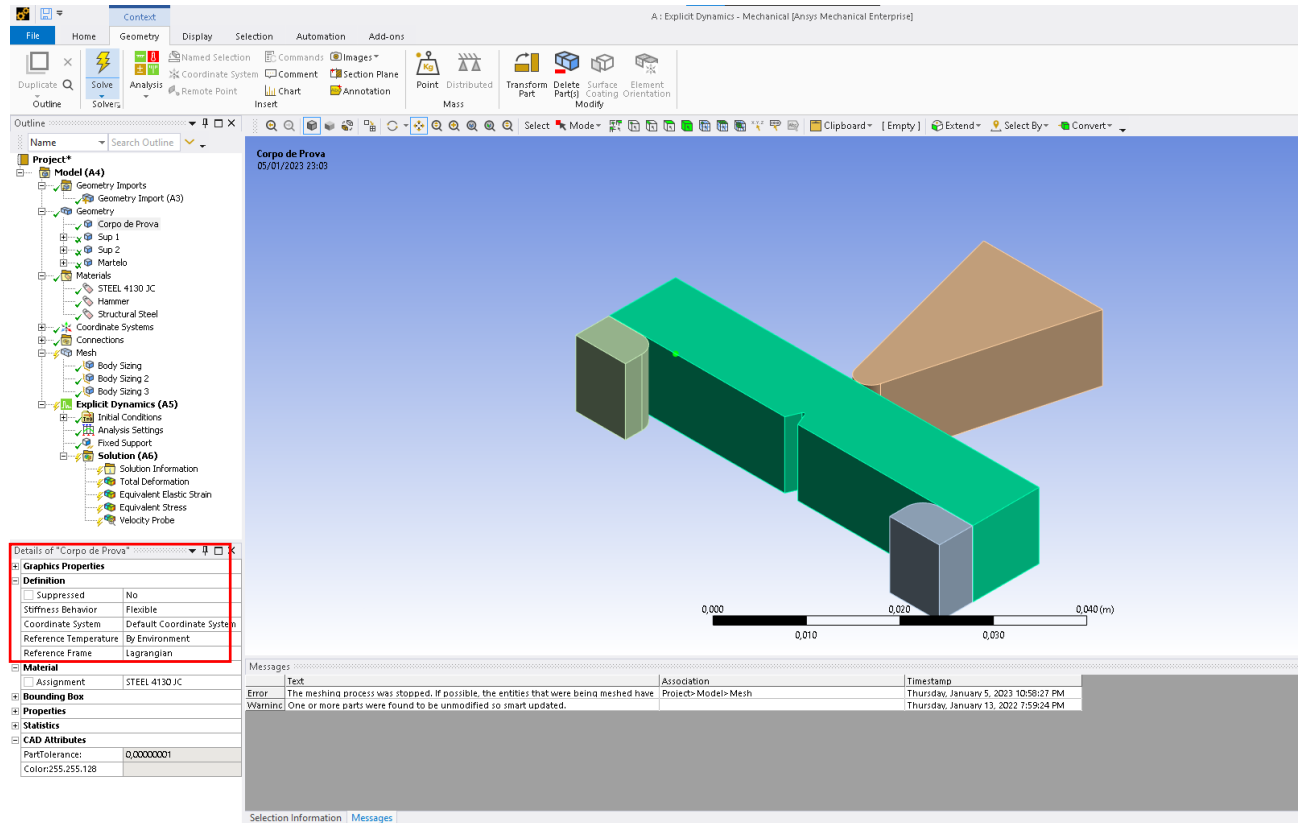
Na parte esquerda da Figura 23 em vermelho é possível observar que o corpo foi dividido em quatro sólidos diferentes. Isto se deve a como a simulação irá ocorrer, sendo importante para que o software entenda que tudo não é apenas um único sólido; neste caso o sólido 1 é o corpo de prova em si, o sólido 2 e 3 são os apoios do corpo de prova e o sólido 4 é o martelo.

3.2.4 Setup do modelo

Durante esta etapa do processo, foram definidos como cada corpo se comportou durante a simulação, além de ter sido definido o material de cada componente da simulação.

Em um primeiro momento é definido o comportamento de cada geometria durante a simulação. Na Figura 25 em vermelho é possível ver aonde essas informações se encontram.

Figura 25 - Estado de Rigidez.

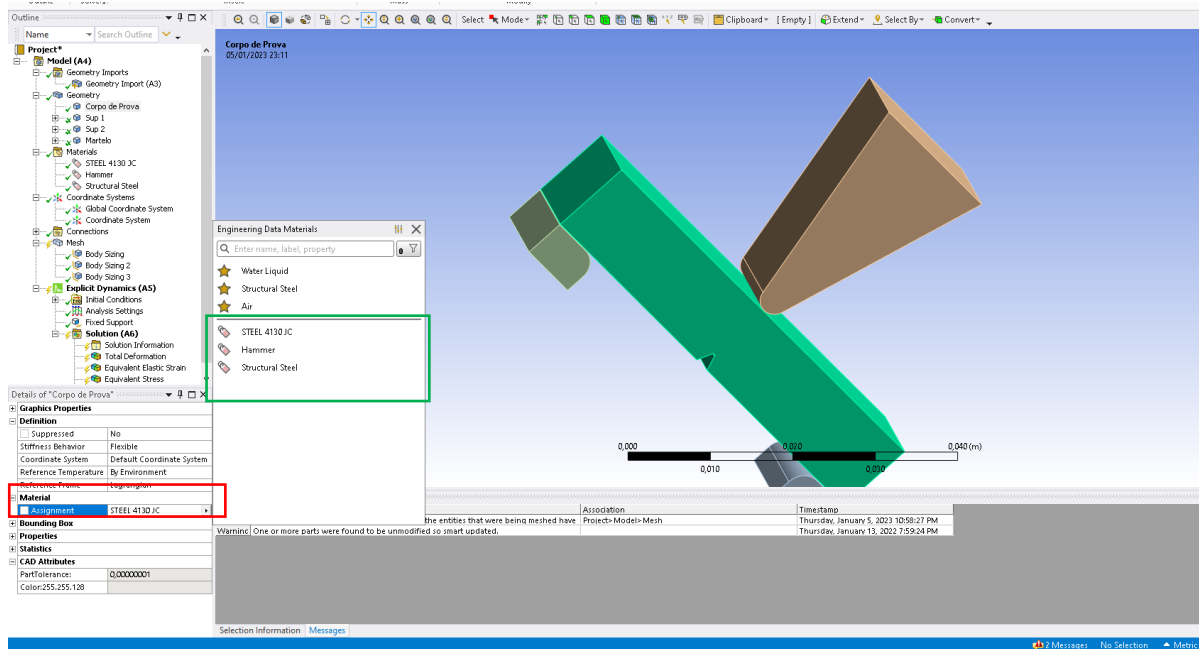


Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso da Figura 25, é possível ver que em *Stiffness Behavior* se encontra como *Flexible*, como o objeto de estudo é o corpo de prova, ele foi o único que ficara em um estado de rigidez flexível, e os outros componentes ficaram como um estado rígido. Isto significa que o único componente que sofrera deformação durante a simulação será o corpo de prova.

Definido o estado de rigidez de cada componente foi definido o material de cada componente ao selecionar a aba *Material* em vermelho, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Seleção dos materiais para cada objeto.

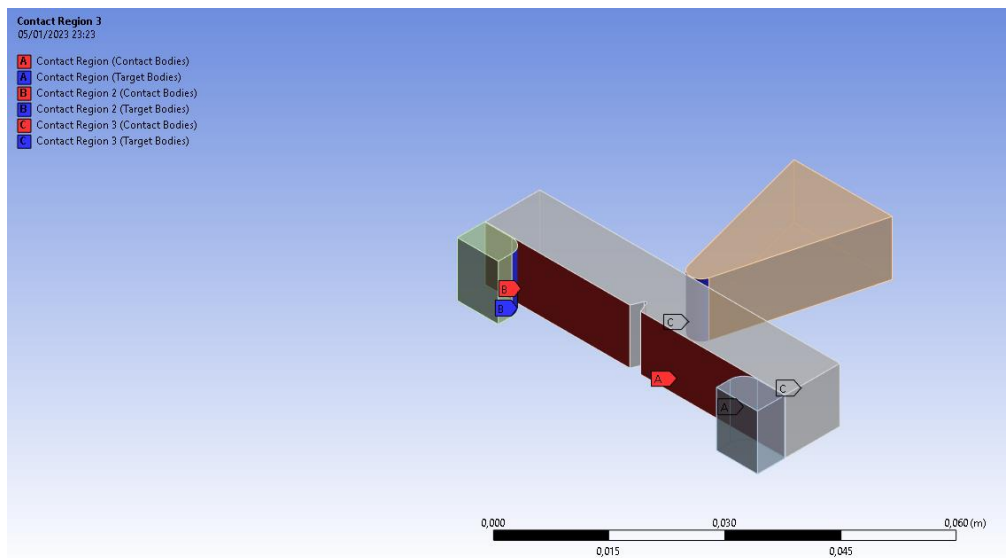


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao selecionar a aba *Material*, uma nova aba se abriu, aonde foi possível selecionar os materiais que foram criados anteriormente em verde. Aonde o *STEEL 4130 JC* foi definido para o corpo de prova, o *HAMMER* foi definido para o martelo e o *STRUCTURAL STEEL* para os suportes.

Selecionado o material, o Ansys de forma automática identificou as regiões de contato entre cada objeto conforme pode ser observado na Figura 27.

Figura 27 - Regiões de contato.

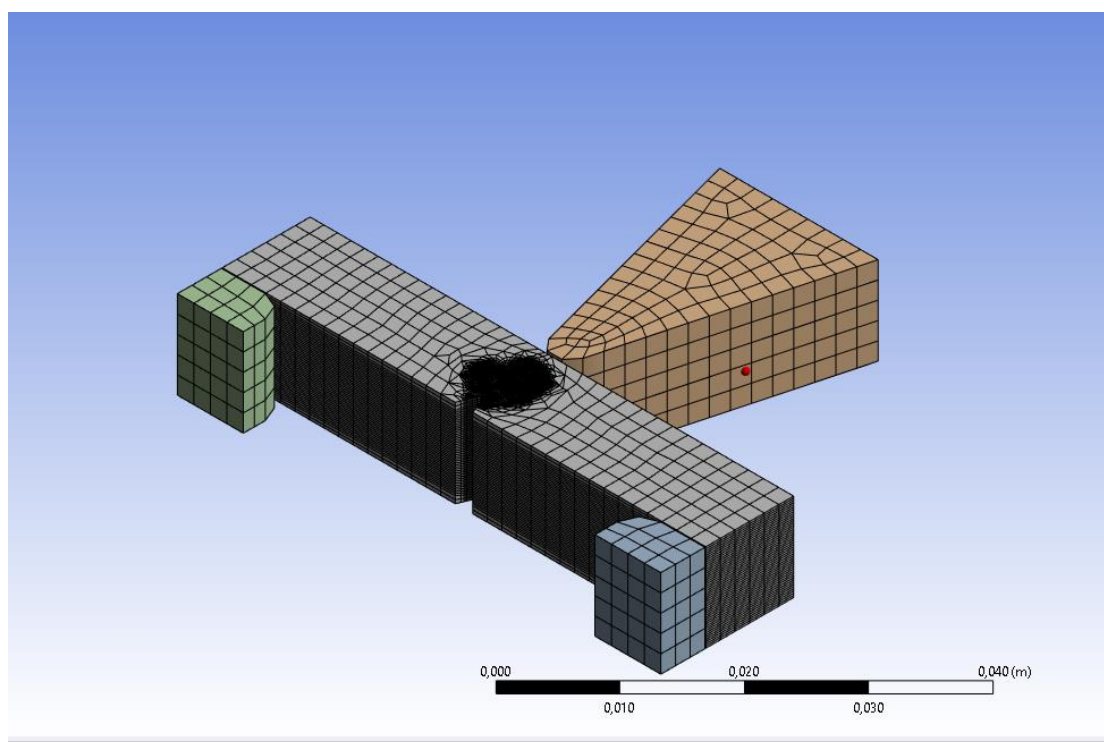


Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta foi uma maneira de observar se a modelação foi feita de maneira correta, pois como esperado existem três regiões de contato, sendo duas regiões na face com o entalhe e os dois apoios e outra região entre o martelo e a face oposta ao entalhe.

A última etapa da definição do modelo foi a criação da malha. Como existem quatro corpos, e apenas um foi o objeto interesse do estudo os outros três corpos foram geradas malhas grosseiras de maneira que não interferissem no tempo de simulação e não ocupassem espaço do processamento, além disso foi gerado um refinamento da malha na região do entalhe para que se pudesse ter um melhor resultado, tendo em vista que foi esperada uma relação em quanto mais fino uma malha melhor é a precisão do seu resultado, essas variações no tamanho da malha podem ser vistas na Figura 28.

Figura 28 - Geração da malha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

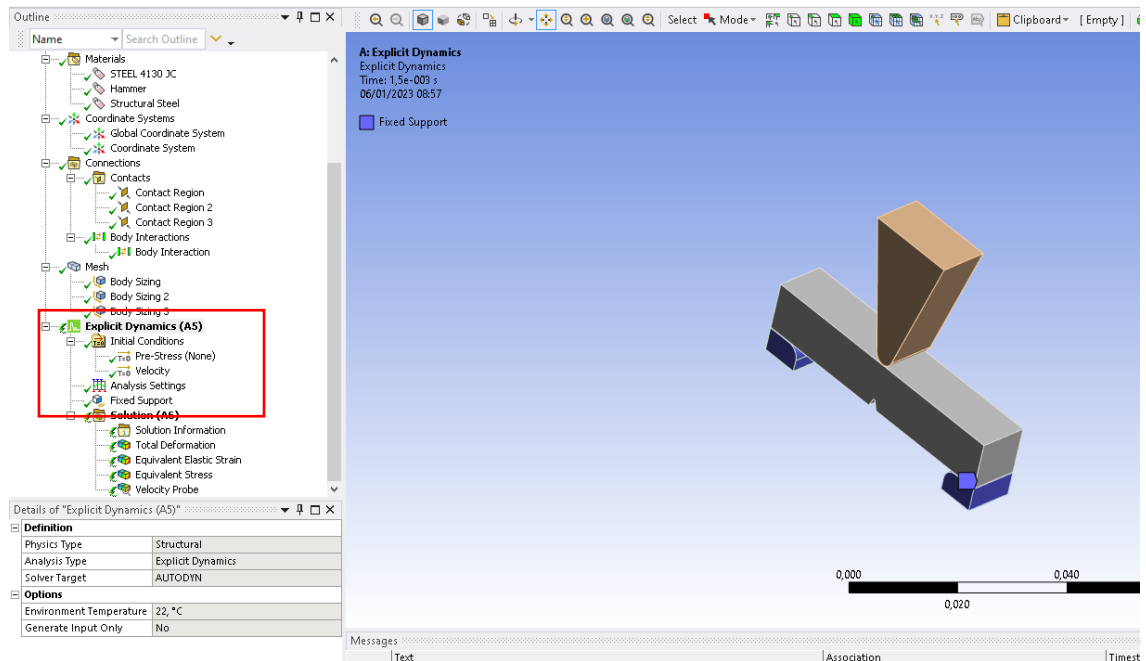
Como pode ser observado as regiões que são menos importantes para o estudo, receberam uma malha mais grossa enquanto que a região que interessa ao estudo recebeu uma granulação de malha mais fina.

3.2.5 Definição da carga e apoio da simulação

Após a realização do setup do modelo foi necessário definir as condições físicas dos testes, ou seja, definir as cargas e os pontos de apoio do sistema inteiro. Foi durante esta etapa

que as funções de análise do *Explicit Dynamics* puderam ser vistas, as funções utilizadas neste tópico se encontram na aba esquerda em *Explicit Dynamics(A5)* conforme indicado em vermelho na Figura 29.

Figura 29 - Condições Iniciais do sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Aqui foram definidas as condições iniciais de carga, as configurações e os suportes da simulação.

Em *Initial Conditions*, existem duas opções dentro do *Explicit Dynamics*, os quais são, *Pre-Stress* e *Velocity*, na primeira opção é utilizada quando há alguma condição de esforço sobre algum corpo, como a intenção é avaliar a energia absorvida durante o impacto foi desconsiderada a força da gravidade que exerce sobre o conjunto. A segunda opção é utilizada para indicar a velocidade inicial de algum objeto, essa opção foi a utilizada para definir a velocidade com que o martelo atinge o corpo de prova.

Conforme definido por ALMEIDA e da SILVA (2015) a energia com que o martelo atinge o corpo de prova foi de 150J, assim se utilizando da equação de Energia Cinética (equação (22)) é possível obter a velocidade com que o martelo atinge o corpo de prova.

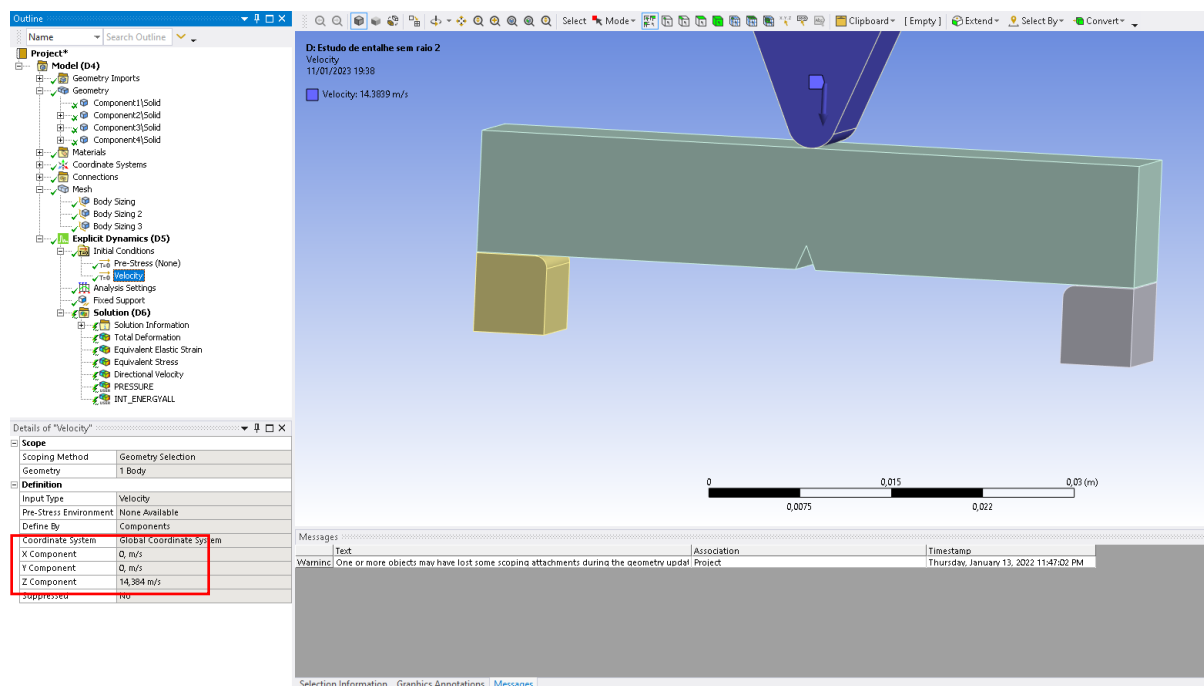
$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (22)$$

Dentro das propriedades de cada corpo foi possível obter a massa do martelo, aonde o mesmo possuía uma massa aproximada de 1,45kg, substituindo os valores conhecidos na equação (22) obtemos que, conforme descrito na equação (23).

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 150J}{1,45kg}} = 14,384 \frac{m}{s} \quad (23)$$

Com isso foi substituído o valor encontrado na equação (23) no campo de velocidade conforme indicado em vermelho na Figura 30, além disso foi possível observar que com a adição do campo velocidade o software gerou um vetor velocidade no martelo.

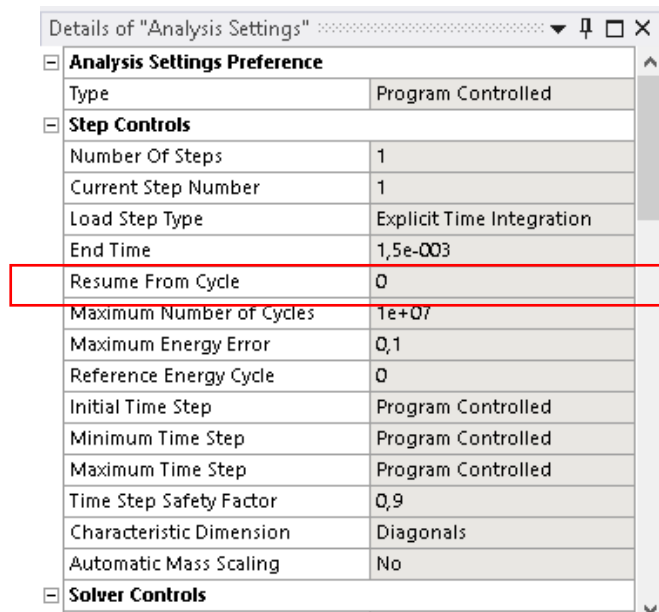
Figura 30 - Vetor Velocidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentro do campo de *Analysis Settings* existe uma série de variáveis que podem ser controladas para ajustar a simulação, conforme indicado em vermelho na Figura 31 apenas o *End Time* foi alterado, pois como o impacto ocorre em uma fração de segundos foi necessário ajustar o tempo de simulação para poucos instantes, assim $1,5 \times 10^{-3}$ segundos foi o tempo que foi simulado, o suficiente para cobrir o impacto e fratura do corpo de prova, essa situação foi necessária para reduzir o tempo de simulação, sendo que os demais parâmetros foram deixados como o Ansys gera automaticamente.

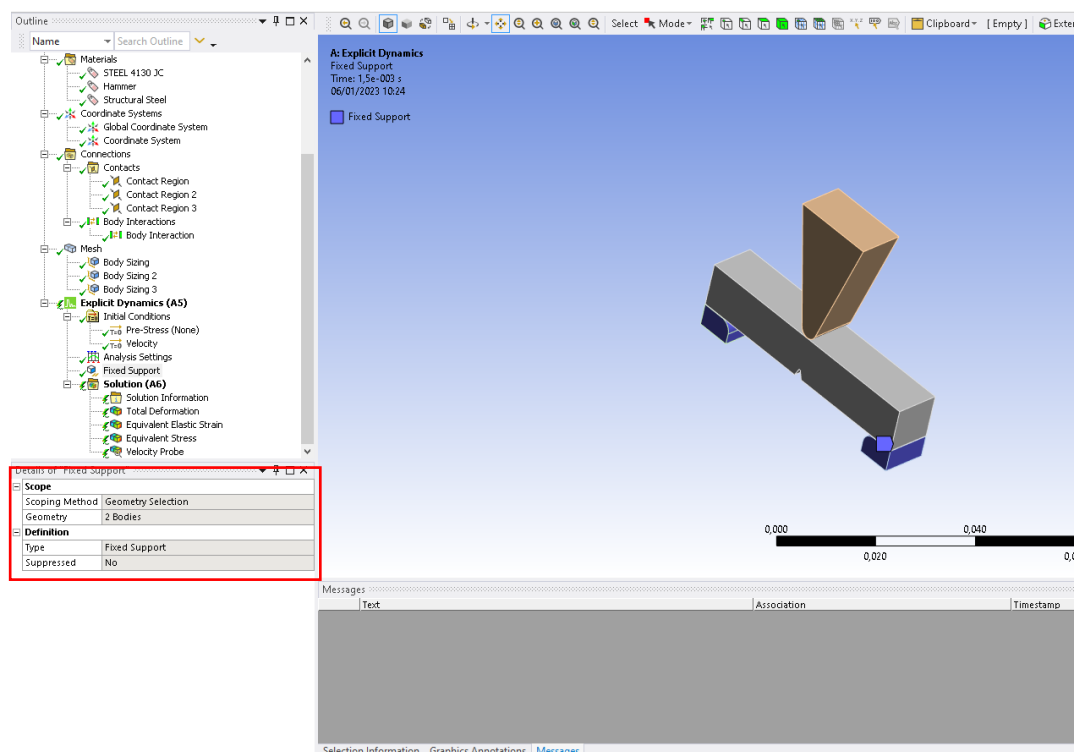
Figura 31 - Ajustes da simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A última variável a ser controlada foi a definição dos apoios da simulação, assim na aba do *Explicit Dynamics* ao clicar com o botão direito é possível adicionar os suportes, conforme indicado na Figura 32 no destaque em vermelho serão dois apoios e são definidos como *Fixed Support*, isso foi necessário para gerar um ponto fixo de apoio para o corpo de prova.

Figura 32 - Suportes do corpo de prova.

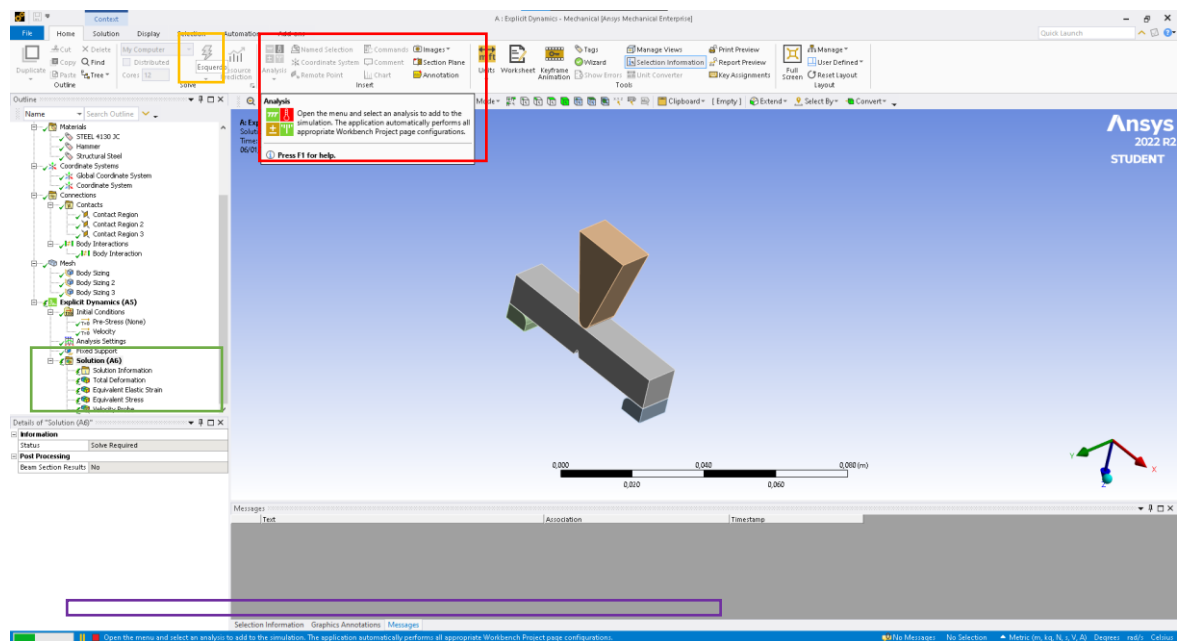


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.6 Solução da simulação

Por fim o último passo antes de iniciar a simulação foram as configurações da simulação, este campo fica na parte superior indicado em vermelho (*Analysis*) neste campo foram selecionados as análises necessárias para este estudo, as análises utilizadas aparecem no campo indicado em verde todas as opções adicionadas, como observado na Figura 33 abaixo.

Figura 33 - Opções da simulação.

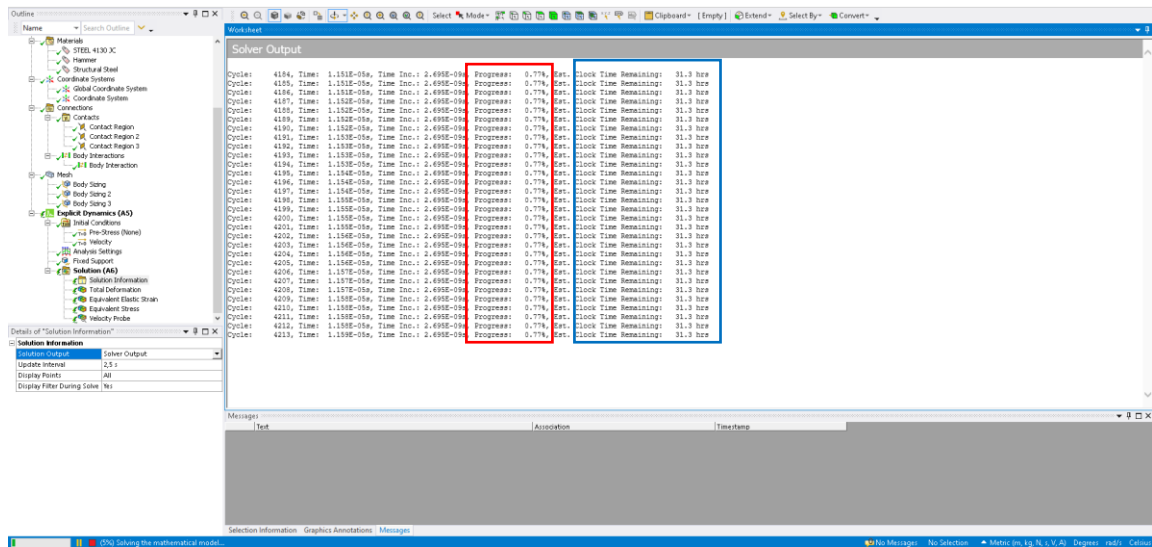


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após isso foi necessário clicar no botão *Solve* indicado em amarelo, para dar início a simulação, na parte inferior (indicado em roxo) foi possível observar uma barra verde indicado que a simulação está ocorrendo.

Ao iniciar a simulação uma nova aba será liberada que é a *Solution Information* a qual é possível observar como a simulação está ocorrendo. Na primeira aba indicada em azul (*Solver Output*) na Figura 33 abaixo, é possível observar o andamento da simulação e o tempo que resta para a simulação ser finalizada, aonde em vermelho indica o progresso em percentagem e em azul quantas horas faltam para o termino da simulação.

Figura 34 - Aba Solver Output.

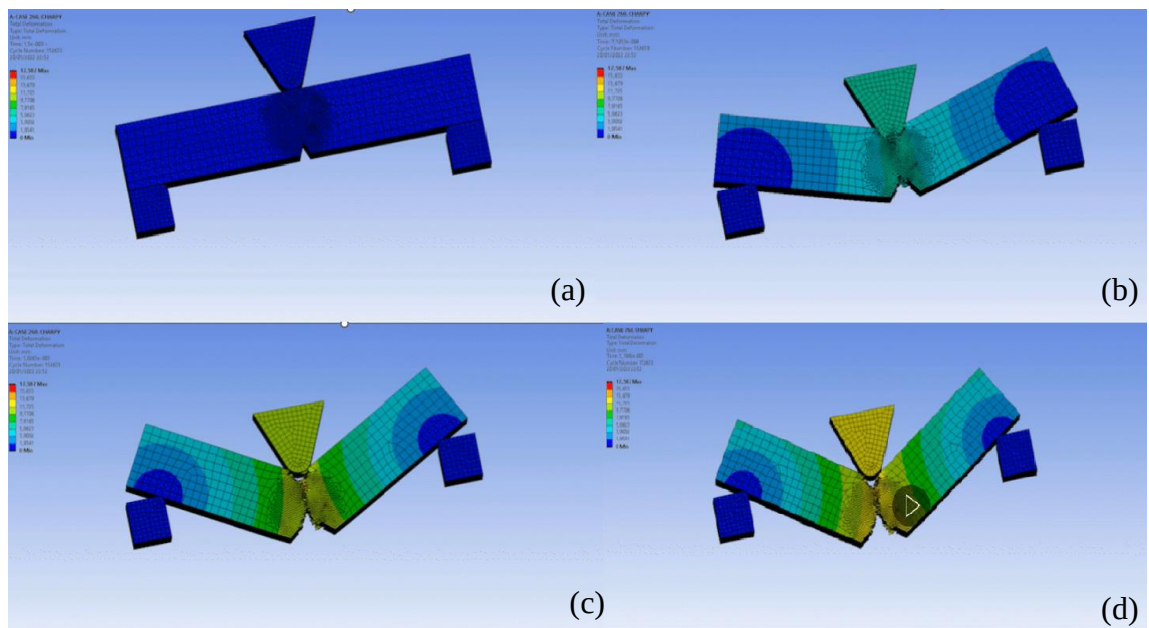


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.7 Resultado da simulação

A última etapa foi o resultado obtido com a simulação, na qual é possível obter dois importantes resultados, o primeiro foi uma animação gerada, contendo o estresse gerado pelo impacto do martelo no corpo de prova e como a fratura ocorre, como pode ser observado na Figura 35, os *frames* gerados durante essa animação.

Figura 35 - Animação da simulação.

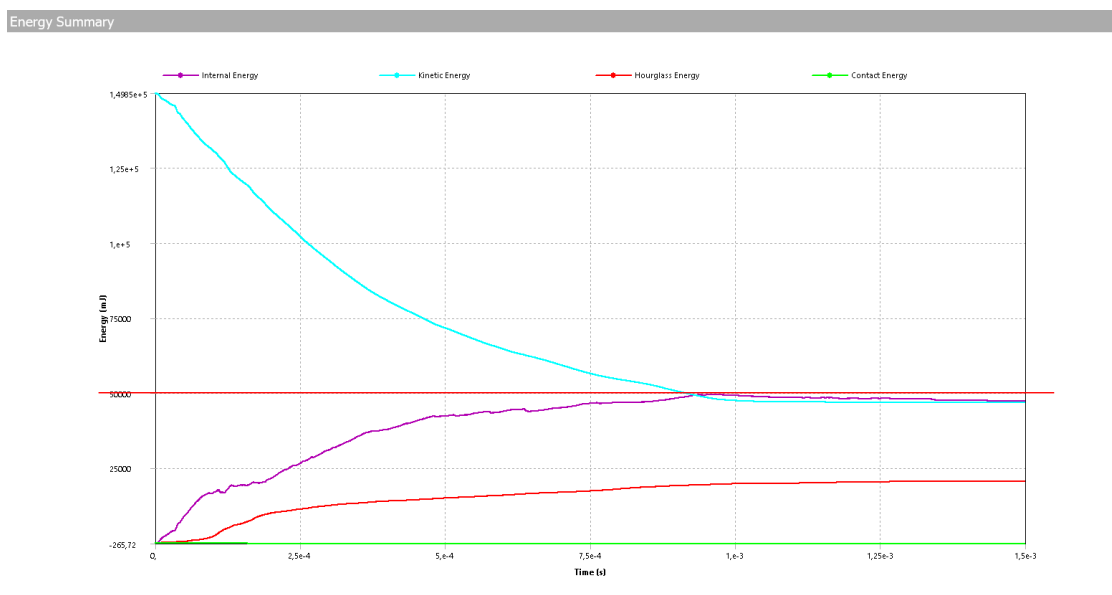


Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode-se observar, na Figura 35, em (a) foi o momento inicial da simulação, em (b) ocorre o início do impacto do martelo no corpo de prova, em (c) é o momento em que ocorre a fratura do corpo de prova e em (d) é o momento em que foi finalizado a animação com a fratura total do corpo de prova.

Além dessa animação verificou-se outro importante dado, que foi o gráfico de energia gerada durante a simulação, verificou-se a partir deste gráfico o resultado desejado da simulação, na Figura 36, foi obtido esse gráfico, no eixo X corresponde ao tempo de simulação, o qual foi definido anteriormente, um tempo máximo de $1,5 \times 10^{-3}$ segundos e no eixo Y é possível observar a energia em Joules, como observado foram geradas quatro linhas, porém só as duas primeiras linhas são importantes para o estudo, roxa e azul, no caso a linha roxa indica a energia interna do corpo de prova durante a simulação (*Internal Energy*) e a linha azul representa a energia cinética (*Kinetic Energy*) do sistema. Está última linha é a linha de controle, na qual é possível ver que a energia inicial do sistema foi de 150 J, outro fato é que o ponto máximo da linha roxa é o tanto de energia que o corpo de prova absorveu durante a simulação, ou seja, nesse caso foi de aproximadamente de 50 J, indicado pela linha vermelha na Figura 36.

Figura 36 - Gráfico de Energia da Simulação.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Este processo foi gerado várias vezes de maneira a se poder comparar diversos cenários dentro da simulação, variando o tamanho da malha e a geometria do entalhe, com intuito de verificar a eficácia da simulação com relação ao ensaio Charpy-V.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO CHARPY-V

A simulação do ensaio Charpy-V foi dividida em duas frentes, para um melhor controle dos resultados, a fim de que fosse possível analisar tanto o efeito do tamanho da malha quanto a variação geométrica do corpo de prova. Na primeira parte foram testados corpos de prova sem o raio de 0,25mm e variando o tamanho da malha na região do entalhe tamanhos distintos; e na segunda etapa foram simuladas utilizando os mesmos tamanhos de malhas, porém com a presença do raio de 0,25mm no entalhe. Diferente de um ensaio normal onde os corpos de prova são expostos a diferentes temperaturas para ver a sua capacidade de absorção de energia em diferentes temperaturas, neste caso a simulação se fixou a uma temperatura ambiente de 20°C devido aos valores das constantes de Johnson-Cook, utilizadas nas simulações, serem para tal temperatura, sendo necessário obter tais constantes para as demais temperaturas.

O objetivo da análise foi relacionar a variação da geometria e o tamanho da malha, em cada simulação uma série de fatores foi observado, como número de elementos gerados, tempo de simulação, tensão de von Mises, o comportamento da fratura e a energia absorvida pelo corpo de prova, obtendo a Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados das Simulações.

Raio do Entalhe	Tamanho do Elemento[mm]	Número de Elementos	Tempo de simulação [horas]	Tensão de von Mises (σ_v)[MPa]	Energia absorvida[J]
Sem raio	0,2	91964	22	-	30
Sem raio	0,3	48700	1,6	698	50,7
Sem raio	0,4	18524	0,8	584	57
0,25 mm	0,2	87836	11,9	788	33,7
0,25 mm	0,3	50300	6,7	715	50,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado foi necessário realizar uma simulação a mais para o modelo sem raio, alterando a malha presente no entalhe para 0,4mm, isso foi necessário devido a versão cedida pela Ansys, a qual limita a simulação para um determinado número de elementos e que

durante o processamento da simulação ultrapassou o número máximo (120 mil elementos). Com isso foi necessário realizar uma nova simulação, para poder gerar correlações referente a tensão de von Mises e a energia absorvida.

No primeiro cenário, no qual foram simuladas sem a presença do raio, foi feita uma redução de 33% do tamanho do elemento na região do entalhe, ocorrendo um aumento de 88,9 % no número de elementos, um aumento de 1275% no tempo de simulação, não foi possível observar a variação da tensão de von Mises devido ao problema descrito anteriormente, e ocorreu uma redução de 41% na quantidade de energia absorvida.

Como pode ser observado com uma redução de 33% no tamanho do elemento, gerou um grande aumento no número de elementos, a principal razão para isso é a maneira com que o Ansys gera a sua malha, fazendo com que as aproximações gerem malhas menores em todo o seu volume. Esse elevado aumento no tempo está ligado diretamente ao número de elementos pequenos, ao iniciar a fratura os elementos são divididos em partes irregulares e menores aumentando a complexidade do problema computacional.

No segundo cenário, aonde foi observado o efeito do raio na simulação, foi feita uma redução de 33% do tamanho do elemento na região do entalhe, gerando um aumento de 75% no número de elementos, um aumento de 78% no tempo de simulação, um aumento de 10% na tensão de von Mises e foi observada redução de 33% na quantidade de energia absorvida.

Ao se comparar as tensões de von Mises em todos os cenários indicam que a uma correlação direta entre a variação de tensão e o refinamento da malha, conforme é descrito na Figura 15, aonde percebe-se que há um aumento na tensão ao se refinar a malha. Comparando as duas tensões de von Mises do cenário sem o raio, percebe-se que seria necessário gerar um maior refinamento da malha para uma melhor convergência da tensão devido à grande discrepância entre os valores encontrados para os tamanhos de elemento de 0,3 e 0,4 mm, apresentando uma diferença de 20% entre suas tensões. Diferente do cenário anterior, ao se comparar as tensões encontradas para o cenário com o raio de 0,25mm, existe uma melhor convergência entre as tensões encontradas para os tamanhos de elementos de 0,3 e 0,2 mm, apresentando uma diferença 9% entre suas tensões. Isto implica que existe um ponto em que o tamanho da malha converge para um nível de tensão.

Outro dado importante foi que o fato descrito acima também foi percebido para a quantidade de energia absorvida, ou seja, quanto mais fina a malha, mais preciso seria o resultado, porém em algum ponto desse refinamento de malha não haverá mais alterações para

tanto para o nível de energia absorvida quanto para a tensão de von Mises, convergindo para a solução final da simulação.

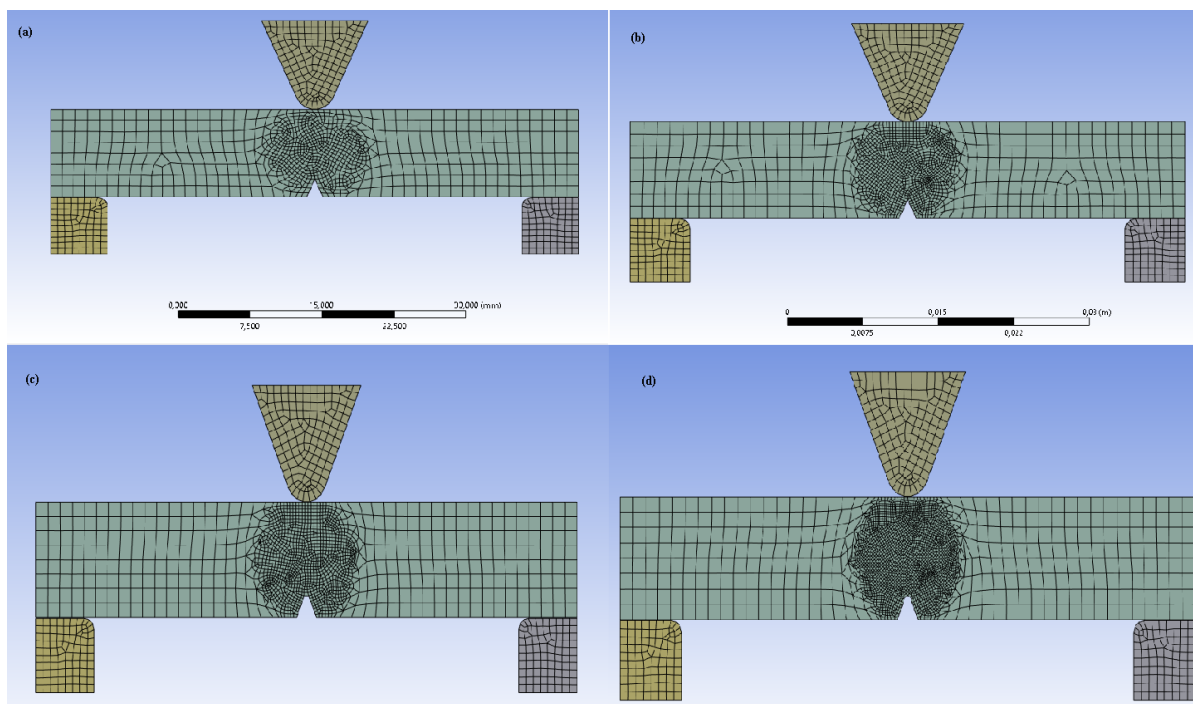
Comparando o tempo de simulação para um tamanho de elemento de 0,3mm em ambos os cenários, foi possível observar que a simulação do cenário com o raio de 0,25mm demorou 4,2 vezes a mais que o cenário sem o raio em seu entalhe. A principal razão para isto ter ocorrido foi a presença do raio que gera diferentes formatos de malha, por consequência formatos mais complexos e um maior número de elementos.

Conforme foi possível observar todos os resultados de energia de absorção absorvida Charpy, são aceitos conforme a norma API recomenda, conforme indicado pela Tabela 3, a norma recomenda uma energia mínima de 27 J enquanto que menor energia encontrada foi de 30 J para uma situação sem o raio no entalhe (1,1 vezes a recomendada) e 33,7 J para uma situação com o raio no entalhe (1,25 vezes a recomendada).

4.2 EFEITO DA MALHA NO ENTALHE

Outro estudo realizado foi o efeito da malha, como descrito anteriormente, a geração da malha determina como o software enxerga o corpo de prova; sendo assim a Figura 37 mostra como a variação do tamanho da malha afeta o real valor da simulação e esse efeito é perceptível nas situações com a presença do raio de 0,25 mm.

Figura 37 - Efeito da malha no Entalhe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

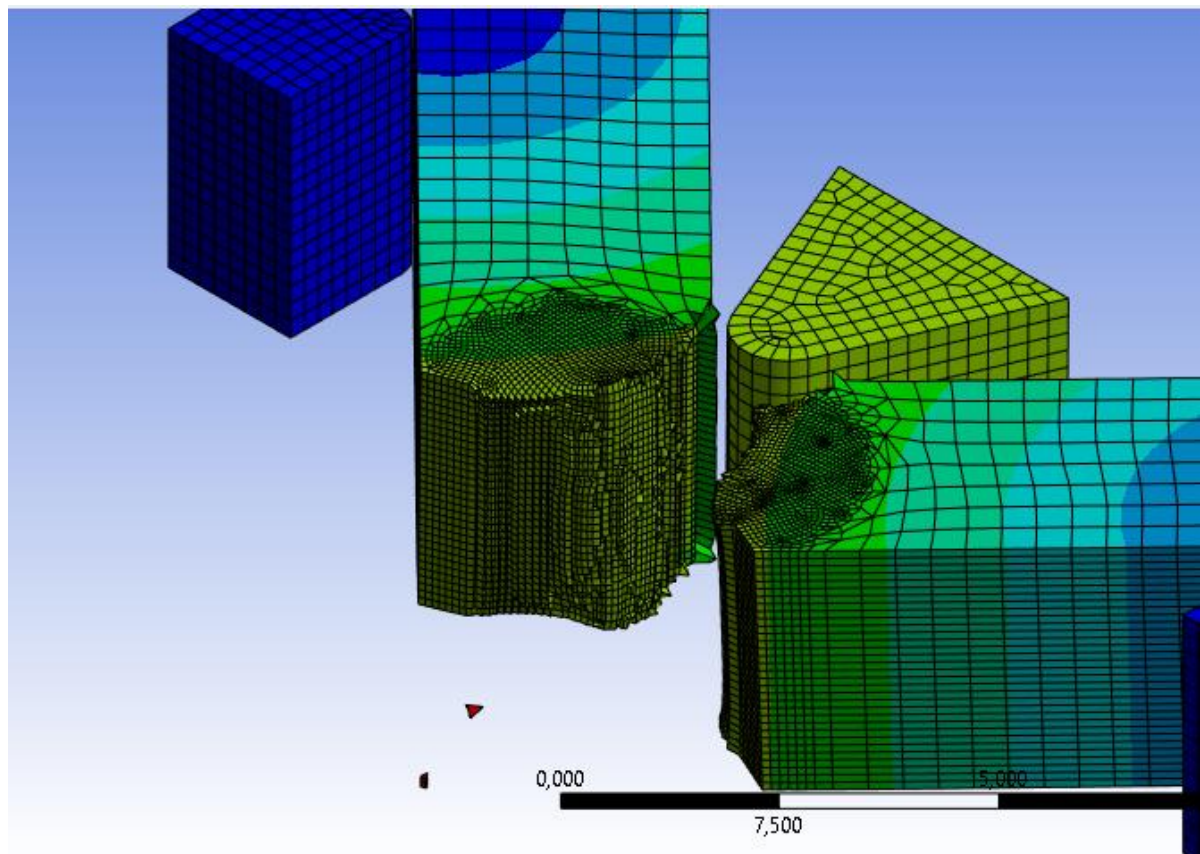
Na Figura 37 foi possível observar que o efeito do tamanho da malha não afeta a geometria do corpo de prova quando não existe o raio de 0,25 mm no entalhe, pois não altera o formato do entalhe isso pode ser observado tanto em (a) quanto em (b), este efeito já se provou o contrário, se compararmos o cenário (c) e (d) em (c) ocorreu uma planificação do entalhe enquanto que em (b) essa planificação é bem menor. Esse efeito gera um impacto direto no resultado da simulação, pois ocorreu um aumento de material na região do entalhe, aumentando assim a capacidade do material absorver energia, isso é observado diretamente nos resultados obtidos da Tabela 8.

Outro efeito notado devido a variação do tamanho da malha foi a capacidade do corpo de prova absorver energia, conforme verificou-se na Tabela 8, ao se comparar os resultados obtidos para um tamanho de malha de 0,3mm, a diferença entre os resultados das simulações entre os corpos de prova com e sem o raio de entalhe foi de 1,2%, essa pequena diferença se deve ao efeito de planificação do entalhe no cenário do raio de 0,25 mm. Esta diferença entre a absorção de energia foi aumentando conforme refinava-se a malha e obtendo uma maior diferença entre os dois cenários, no caso para o tamanho de elemento de 0,2 mm a diferença aumenta para 11%. Assim quanto mais fina a malha essa diferença entre a capacidade de absorver energia entre as duas geometrias foi aumentando.

4.3 SUPERFÍCIE FRATURADA

Outro efeito que é possível observar na simulação, foi o efeito da propagação da trinca, isso é bem perceptível na animação gerada conforme demonstrado Figura 35, aonde foi observado que a trinca se inicia na região do entalhe e se propaga até a total fratura do corpo de prova. A Figura 39 demonstra o efeito superficial gerado durante a simulação. Como foi possível observar o software acaba gerando uma superfície granulada assim como esperado pelo ensaio. O grande problema para realizar este tipo de análise foi o refinamento da malha necessário para tirar uma conclusão do tipo de fratura (dúctil ou frágil), obtido a partir da superfície fraturada, sendo que seria necessário um refino muito grande da malha e um elevado tempo de simulação computacional para obter tal resultado e assim realizar esta análise.

Figura 38 - Efeito da superfície Fraturada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, constatou-se que o objetivo proposto de avaliar a possibilidade de utilizar o método de elementos finitos para obter resistência ao impacto do aço API 5CT grau N80 tipo Q, em diferentes geometrias de entalhe e tamanho de malha, foram cumpridas. Assim, as seguintes conclusões são apresentadas:

- O método de elementos finitos se provou bem confiável, se comparando as especificações da norma API quanto a tenacidade ao impacto analisada em temperatura ambiente (20°C), que apresenta uma diferença de 3 a 23,7J acima do exigido pela norma. Salientando que foram utilizadas as constantes de Johnson-Cook do Aço SAE 4130, devido à falta dessas constantes para o material alvo do estudo.
- O efeito da variação da geometria é perceptível conforme se varia o nível de refinamento da malha, ou seja, quanto mais grossa a malha menos perceptível é essa diferença entre a capacidade de absorção de energia, enquanto que quando se refina a malha essa diferença acaba ficando mais perceptível.
- Apesar de a variação geométrica impactar no resultado, foi possível perceber que a variação para os refinamentos utilizados gera uma redução de no máximo 12% na energia de impacto, evidencia que sustenta a possibilidade do uso do entalhe sem o raio para as simulações, já que o mesmo diminui o tempo e possui resultados mais conservadores que a norma.
- O nível de refinamento da malha está ligado diretamente como o software irá acusar aquela geometria, isso foi bem percebido com relação ao efeito de planificação da região do entalhe, na situação com o raio de 0,25mm. Outro fator importante foi o efeito de convergência que acontece conforme se refina a malha, de uma maneira que quanto menor o tamanho da malha mais preciso é o resultado.
- O maior problema encontrado foi a dependência deste modelo com as constantes de Johnson-Cook, assim para uma obtenção mais precisa dos resultados seria necessário a obtenção de tais constantes para uma gama de variações de temperatura, para assim poder avaliar a tenacidade utilizando o método de elementos finitos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.D.; DA SILVA, E.R. Dimensionamento de um equipamento para ensaio de impacto Charpy. **UniRV**, Rio Verde, 2015. Universidade de Rio Verde. 2015. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/Artigo%20-%20Dimensionamento%20de%20um%20Equipamento%20para%20Ensaio%20de%20Impacto%20Charpy%20-%20Academico%20Maycon%20Douglas%20Le%20C3%A3o%20de%20Almeida.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- ALVES, Claudemir Claudio. *et al.* **Habilitação técnica em mecânica: Projetos e Ensaios Mecânicos**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5CT. **Specification for casing and tubing**. United States of America. 2010. Disponível em: <https://www.unitedsteel.com/productshow/drill-pipe.html?gclid=CjwKCAjw-e2EBhAhEiwAJI5jg4TY8V KkLutl5jptiGK8cwfCzxSJrJFE>. Acesso em: 21 nov. 2021.
- ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Properties and selection: irons, steel, and high-performance alloys**. Novelty, Ohio: ASM International, 1990.
- BATHE, Klaus-Jürgen. **Finite Element Procedures**. New Jersey, Prentice Hall: Edgard Blücher Ltda., 1996. 1037p.
- BERGSTRÖM, Y. The plastic deformation of metals: a dislocation model and its applicability. **Reviews powder metallurgy and physical ceramics**, Estocolmo, v.2, n.2, p. 79-265, 1983.
- BHADESHIA, H. R. *et al.* **Steels microstructure and properties**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. v. 2, p. 275.
- CALLISTER, W. D. *et al.* **Ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 2, p. 395.
- CAMPBELL, J.D.; FERGUSON, W.D. The temperature and strain-rate dependence of the shear strength of mild steel. **Philosophical Magazine**, Londres, v.21, n.8, p. 63-82, 1970.
- CARVALHO, G.H. **Resistência ao colapso e caracterização metalúrgica de tubo API 5CT N80Q**. 2015. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/-7/2015-2/278--258/file>. Acesso em: 17 dez. 2022.
- CLIFTON, R.J. Dynamic plasticity. **ASME Journal of Applied Mechanics**, Nova York, v.50, n.4, p. 941-952, 1983.
- COLPAERT, Hubert; COSTA E SILVA, André. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns: metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. v. 2, p. 405.
- GARCIA, A. *et al.* **Ensaio de Materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2012.

GODOI, R. A. **Determinação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API SCT N80Q (em baixa temperatura)**. 2021. Monografia de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2021.

GOUVEA, B.; RODRIGUES, J. *et al.* **Tecnologia Mecânica: tecnologia da deformação plástica**. vol.3. São Paulo: Escolar Editora, 2011

HAMMER, Jeremiah Thomas. **Plastic deformation and ductile fracture of Ti-6Al-4V under various loading conditions**. 2012. Tese (Doutorado em ciências) – The Ohio State University.

JOHNSON, Gordon R.; COOK, Willian H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strains rates, and high temperatures. **Intertational symposium on ballistics**, n.7, The Hague, p.541-547, 1983.

JOHNSON, Gordon R.; COOK, Willian H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperature and pressure. **Engineering fracture mechanics**, [S.l.], v.21, n. 1, p. 31-48, 1985.

LESAR, Richard. **Introduction to computational materials science**. Iowa: Iowa State University, 2013. Disponível em: <http://www.icmr.ucsb.edu/programs/summer-school-2013/LeSar%20UCSB%20Summer%20School.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022.

LINDHOLM, U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Texas, v. 12, n.5, p. 317-335, 1964.

LUDWIK, P. Über den Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungserscheinungen. **Physikalische Zeitschrift**, v. 10, n. 12, p. 411-417, 1909.

MELO, L. C. R. *et al.* **Desenvolvimento de tubo ARBL contendo 1Cr 0,2Mo fabricado pelo processo ERW/HF destinado à indústria de petróleo e gás**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94462>. Acesso em: 12 out. 2021.

MEYERS, M.A. **Dynamic behavior of materials**. Nova York: John Wiley & sons, 1994.

MIRLISENNA, Giuseppe. **Método dos elementos finitos: o que é?** In: Blog ESSS [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>. Acesso em: 12 dez. 2022.

NORTON, R.L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda, 2013. p. 1055.

OLIVEIRA, B. F. D. *et al.* **Efeito do tratamento térmico sobre as microestruturas e as propriedades do aço**. 2014. Dissertação (Mestrado em microestruturas) - Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wpcontent/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o1.pdf>. Acesso em: 30 dez 2022.

PROVENZA, F. **Materiais para construções mecânicas**. São Paulo: Editora F. Provenza, 1982. p. 904.

SHACKELFORD, J.F. **Ciência dos materiais**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008. p. 576.

SILVA, A. L. V. D. C. *et al.* **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Blücher, 2010. v. 2, p. 375.

SOUZA, S. A. *et al.* **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1982. p. 304.

SPRINGER, W.; JONG, I. Teaching von mises stress: from principal axes to non-principal axes. *In: AMERICAN SOCIETY FOR ENGINEERING EDUCATION ANNUAL CONFERENCE AND EXPOSITION*, 27. ed., 2009, Austin, Texas. **Trabalhos apresentados[...]**. Columbus: American Society for Engineering Education (ASEE), 1985.p. 11591- 11599.

VIANA, C. *et al.* Validação experimental de um modelo analítico numérico para determinação dos parâmetros de Johnson & Cook para o aço AISI 1045. *In: ABM WEEK*, 5. ed., 2019, São Paulo. **Trabalhos apresentados[...]**. São Paulo: ABM, 2019. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/validao-experimental-de-um-modelo-analtico-numrico-para-determinao-dos-parmetros-de-johnson-cook-para-o-ao-aisi-1045>. Acesso em: 21 jan. 2021.

WUERTEMBERGER, L.A. **Evaluation and correlation of dynamic flow, failure, and microstructural properties of heat- treated 4130 steels**. 2016. Dissertação (Ph. D.) – Air Force Institute of Technology, Hobson Way, Ohio, 2016. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD1054273>. Acesso em: 15 dez. 2021.