

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Lucas José Rodrigues

**ANÁLISE DE FALHAS E OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM MARTELOS
TRITURADORES DE SUCATA VIA SIMULAÇÃO NO ANSYS WORKBENCH**

Betim
2023

LUCAS JOSÉ RODRIGUES

**ANÁLISE DE FALHAS E OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA EM MARTELOS
TRITURADORES DE SUCATA VIA SIMULAÇÃO NO ANSYS WORKBENCH**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim
para obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Hélio Luiz Simonetti

Betim
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

R696a Rodrigues, Lucas José

Análise de falhas e otimização topológica em martelos trituradores de sucata via simulação no Ansys Workbench / Lucas José Rodrigues. – 2023.

78 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Hélio Luiz Simonetti

1. Otimização topológica. 2. Software Ansys. 3. Sucata de metais. 4. Localização de falhas (Engenharia). 5. Engenharia mecânica. I. Lucas José Rodrigues. II. Título.

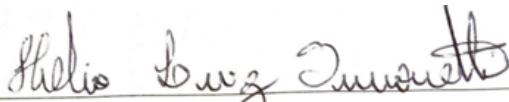
CDU: 621

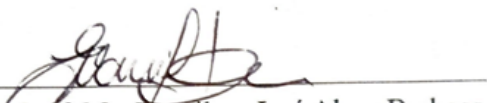
LUCAS JOSÉ RODRIGUES

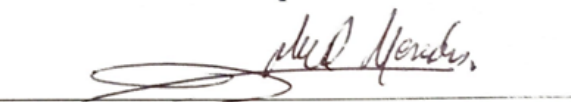
**ANÁLISE DE FALHAS E OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA EM MARTELOS
TRITURADORES DE SUCATA VIA SIMULAÇÃO NO ANSYS WORKBENCH**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim
para obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Mecânica.

Aprovado em: 04/08/2023 pela banca
examinadora: BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Hélio Luiz Simonetti (Orientador)
IFMG Campus Betim


Prof. Me. Evanilton José Alves Barbosa
IFMG Campus Betim


Prof. Dr. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho
IFMG Campus Betim

DEDICATÓRIA

À minha querida família, a quem dedico este trabalho com profundo amor e gratidão. Aos meus pais, fontes inesgotáveis de inspiração e dedicação. A vocês, que sempre aguardam ao meu lado, incentivando-me, orientando-me e iluminando o meu caminho com sabedoria e amor, eu dedico esta conquista. Os valores que vocês inculcaram em mim, a coragem que me protegeram em todos os momentos, serviram como alicerce para a construção de cada página deste trabalho.

Dedico a vocês este marco em minha vida, como um símbolo do meu amor, respeito e profunda gratidão. É através do amor de vocês e apoio que esta conquista foi possível. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar a minha mais profunda gratidão a Deus, por ter me guiado em cada passo deste caminho e por ter me proporcionado saúde e perseverança para superar cada obstáculo que se apresentou ao longo desta jornada.

À minha amada família e minha esposa, que me apoiaram incansavelmente em todos os momentos. Aos meus pais, cujo amor, sabedoria e incentivo foram fundamentais para a minha formação como pessoa e profissional. Vocês foram a inspiração que me levaram a seguir adiante, mesmo nos momentos mais difíceis. Aos meus tios, cuja amizade e companheirismo sempre me encorajaram a perseguir meus sonhos.

À minha querida esposa, cujo amor e paciência contribuíram para que essa jornada muito fosse mais suave. Você esteve ao meu lado em cada momento, compartilhando comigo as alegrias e desafios, e tornando-se a força que eu precisava para superar as longas noites de estudo e trabalho. Sua presença em minha vida tem sido um presente inestimável e sou eternamente grato por tudo o que você é.

Aos meus professores, gostaria de expressar minha mais sincera gratidão. Vocês não apenas me orientaram academicamente, mas também me ensinaram a ser um pensador crítico e questionar o mundo ao meu redor. Cada um de vocês desempenhou um papel fundamental na minha formação, não apenas como estudante, mas como ser humano. Agradeço pela paciência, pela dedicação, pelo conhecimento compartilhado e, sobretudo, pelo estímulo à busca incessante do saber.

Finalmente, quero agradecer a todos os meus amigos e colegas de classe que compartilharam comigo essa jornada. A camaradagem, o espírito de equipe e o apoio mútuo foram essenciais para tornar o percurso este mais agradável e menos árduo.

Este trabalho é resultado de um esforço coletivo, de amor, paciência e persistência. A todos que de alguma forma eu defendo para a minha formação, meu mais sincero obrigado.

Resumo

Este trabalho utiliza o software ANSYS Workbench para analisar falhas em martelos de triturador de sucatas e aplicar a Otimização Topológica (OT). O objetivo é melhorar o projeto, reduzindo o peso e aumentando a eficiência durante o ciclo de vida útil. O triturador possui martelos rotativos que fragmentam o material inserido. A otimização topológica busca a melhor distribuição de material, maximizando a resistência e minimizando o peso. O estudo utiliza o Ansys Workbench, criando um modelo CAD com condições de contorno e restrições. A implementação da otimização topológica contribui para o desempenho da máquina e redução dos custos de fabricação dos martelos. No triturador, os martelos são fundamentais e geralmente feitos em aço manganês austenítico. Porém, apresentam falhas devido à falta de resistência, baixa resistência ao escoamento e tração, e crescimento de carbonetos em temperaturas entre 200°C e 300°C. Identificar essas falhas é importante para aumentar a eficiência e reduzir custos.

Palavras-chave: ANSYS Workbench, Martelos, Aço Nano – Bainítico, Análise de Falha.

Abstract

This work utilizes the ANSYS Workbench software to analyze failures in hammers of a scrap shredder and apply topology optimization. The aim is to improve the design by reducing weight and enhancing efficiency during the operational cycle. The shredder features rotating hammers that fragment the inserted material. Topology optimization is employed to achieve the optimal material distribution, maximizing strength while minimizing weight. The study utilizes Ansys Workbench by creating a CAD model with boundary conditions and design constraints. Implementing topology optimization contributes to the machine's performance and reduces hammer manufacturing costs. In the shredder, hammers play a crucial role and are typically made of austenitic manganese steel. However, they are prone to failures such as insufficient strength, low yield and tensile strength, and carbide growth at temperatures between 200°C and 300°C. Identifying these failures is vital for improving efficiency and reducing costs.

Keywords: Keywords: ANSYS Workbench, Shredder Hammer, Nano-Bainitic Steel, Failure Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 - ARRANJO GERAL SHREDDER.....	15
FIGURA 02 - SIST. DE ROLOS DE ALIMENT. MONT. DOS MART. DO SHREDDER.....	20
FIGURA 03 - VISTA PARCIAL CÂMARA DE TRITURAÇÃO DO SHREDDER.....	21
FIGURA 04 - EV HAMMER IMPACT CRUSHER.....	24
FIGURA 05 - ANÁLISE MET. AÇO AUST. MANG. E VARREDURA (MEV) / (ED).....	24
FIGURA 06 - DESENHO BASE DO MARTELO APLICADO – SHREDDER.....	27
FIGURA 07 - CONFIG. DA SIMULAÇÃO PARA O PROC. DE FUND. DO MARTELO – SHREDDER.....	28
FIGURA 08 - AVALIAÇÃO (NIYAMA) MARTELO – SHREDDER.....	30
FIGURA 09 - AVALIAÇÃO (POROSIDADE EM %) MARTELO – SHREDDER.....	31
FIGURA 10 - AVALIAÇÃO (TAXA DE RESFRIAMENTO) MARTELO – SHREDDER.....	32
FIGURA 11 - FALHA EM MARTELO – SHREDDER (120 HORAS DE TRABALHO).....	33
FIGURA 12 - ARRANJO GERAL DAS FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA – SHREDDER.....	35
FIGURA 13 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS FORÇAS ATUANTES NO SIST. – SHREDDER.....	36
FIGURA 14 - MODELAGEM MATEMÁTICA DAS FORÇAS ATUANTES NO SIST. – SHREDDER.....	36
FIGURA 15 - INDICAÇÃO DAS FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA – SHREDDER.....	37
FIGURA 16 - DIAGRAMA BÁSICO MOSTRANDO A QUEBRA DE MATERIAIS – SHREDDER.....	37
FIGURA 17 - INPUT MATERIAL NA BIBLIOTECA ANSYS WORKBENCH.....	38
FIGURA 18 - INPUT MATERIAL NA BIBLIOTECA ANSYS WORKBENCH.....	39
FIGURA 19 - CONFIGURAÇÃO DA MALHA PARA ANÁLISE - ANSYS WORKBENCH.....	40
FIGURA 20 - INPUT 1 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (VELOCIDADE DE GIRO).....	41
FIGURA 21 - INPUT 2 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (PIVOTAM. DO MARTELO AO EIXO)....	42
FIGURA 22 - INPUT 3 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (CONTATO 1 – QUEBRA DE MAT.).....	42
FIGURA 23 - INPUT 4 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (CONTATO 2 – QUEBRA DE MAT.).....	43
FIGURA 24 - INPUT 5 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (CONTATO 3 – QUEBRA DE MAT.).....	43
FIGURA 25 - INPUT 6 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (CONTATO 4 – QUEBRA DE MAT.).....	44
FIGURA 26 - INPUT 7 - FORÇAS ATUANTES NO SISTEMA (CONTATO 5 – QUEBRA DE MAT.).....	44
FIGURA 27 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS ANSYS WORKBENCH.....	45
FIGURA 28 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS ANSYS WORKBENCH.....	47

FIGURA 29 - INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS ANSYS WORKBENCH.....	48
FIGURA 30 - IMPORTAÇÃO DO MODELO CAD - ANSYS WORKBENCH.....	53
FIGURA 31 - DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO - ANSYS WORKBENCH.....	54
FIGURA 32 - RESULTADO DA ANÁLISE ESTÁTICA - ANSYS WORKBENCH.....	54
FIGURA 33 - CONFIGURAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA - ANSYS WORKBENCH.....	55
FIGURA 34 - EXECUÇÃO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA - ANSYS WORKBENCH.....	55
FIGURA 35 - PARÂMETROS DE CONFIG. DA OTIMIZAÇÃO TOP. - ANSYS WORKBENCH.....	56
FIGURA 36 - ANÁLISE DO RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA - ANSYS WORKBENCH..	57
FIGURA 37 - RESULTADO DA OTIMIZ. TOP. PONTOS DE MELHORIA - ANSYS WORKBENCH.....	60
FIGURA 38 - REPARO DE ERROS E REFINAMENTO GEOMÉTRICO.....	60
FIGURA 39 - REFINAMENTO GEOMÉTRICO.....	61
FIGURA 40 - ACOPLAM. DE ANÁLISES PARA VALID. NO AMBIENTE – ANSYS WORKBENCH.....	61
FIGURA 41 - ANÁLISE (FEA) PARA VALID. DO MODELO OTIMIZ. (AÇO NANO BAINÍTICO).....	62
FIGURA 42 - ANÁLISE (FEA) PARA VALIDAÇÃO DO MODELO – ANSYS WORKBENCH.....	63
FIGURA 43 - CONFIGURAÇÃO DE MALHA VALIDAÇÃO DO MODELO – ANSYS WORKBENCH.....	64
FIGURA 44 - CONFIGURAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO – ANSYS WORKBENCH.....	64
FIGURA 45 - RESULTADO DA MAG. EQUIV. DEFORMAÇÃO ELÁSTICA – ANSYS WORKBENCH..	65
FIGURA 46 - DEFORMAÇÃO TOTAL – ANSYS WORKBENCH.....	66
FIGURA 47 - TENSÃO EQUIVALENTE (VON-MISSES) – ANSYS WORKBENCH	67
FIGURA 48 - ANÁLISE DO PROCESSO DE TRITURAÇÃO 1 (VON-MISSES) – ANSYS WORKBENCH ROCKY 3D.....	68
FIGURA 49 - ANÁLISE DO PROCESSO DE TRITURAÇÃO 2 (VON-MISSES) – ANSYS WORKBENCH ROCKY 3D.....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - COMP. QUÍMICA DO MARTELO DE AÇO MANGANÊS AUST. E AÇO CFB.....	25
TABELA 02 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA AÇO NANO - BAINÍTICO DIN WN 1.6511 + 2SI.....	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Conjunto específico de números reais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Análise Estática
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Análise Topológica
c	Flexibilidade
CAD	Computer-Aided Design
CFB	Circulating Fluidized Bed
DEM	Discrete Element Method
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Modulo de Young original do material na fase sólida
EDS	Energy Dispersive Spectroscopy
ESO	Evolutionary Structural Optimization
f	Vetor de carregamento global f – Função genérica
F	Vetor global de força
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Method
Fx	Força atuante no eixo X Fy - Força atuante no eixo Y K - Matriz de rigidez global
k0	Matriz de rigidez elementar para um elemento com Módulo de Young unitário
Ke	Matriz de rigidez de um elemen. de um material sólido M – Momen. de uma força
MEF	Método de Elementos Finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
N	Conjunto das funções de interpolação Ni - i-ésima função de interpolação
OT	Otimização Topológica
SESO	Smoothing Evolutionary Structural Optimization
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalizatio
u	Conjunto dos parâmetros nodais
u	Variável primária
u	Vetor de deslocamento U - Vetor de deslocamento global
xe	Vetor de densidades dos elementos
ρ	Vetor densidade

SUMÁRIO

1. Introdução.....	15
2. Mecânica dos Materiais	18
2.1 Desgaste	18
2.2 Resistência ao Impacto.....	19
2.3 Material Alternativo	20
3. Descrição dos Materiais	23
4. Métodos Experimentais Para Obtenção de Dados	27
4.1 Simulação do Processo de Fundição	27
4.2 Parâmetros Analisados Para a Simulação do Processo de Fundição (Aço Manganês)	29
4.2.1 Formação de Porosidade no Processo de Fundição (Niyama)	29
4.2.2 Formação de Porosidade em %	29
4.2.3 Taxa de Resfriamento.....	30
4.3 Análise Processo de Fundição Para o Aço Manganês no Ambiente de Simulação.....	30
4.3.1 Formação de Porosidade no Processo de Fundição (Niyama) – Análise de Resultado.....	30
4.3.2 Formação de Porosidade em % – Análise de Resultado	31
4.3.3 Taxa de Resfriamento – Análise de Resultado.....	31
4.4 Análise de Falhas em Martelos para Shredder Hammer - ANSYS Workbench	32
4.5 Modelagem e Discretização das Forças Atuantes no Sistema de Martelos Shredder	34
4.6 Input dos Dados Obtidos Anteriormente na Plataforma ANSYS Workbench.....	37
4.6.1 Input de Materiais na Biblioteca ANSYS Workbench.....	38
4.6.2 Configuração – Malha Para a Análise Estrutural (FEM)	39
4.6.3 Input dos Dados Obtidos e Definição das Condições de Contorno	41
4.6.4 Resultado da Análise por Elementos Finitos	45
5. Otimização Topológica (ANSYS Workbench) considerando o Aço Nano Bainítico.....	49
5.1 Otimização Topológica (Revisão).....	49
5.2 Teoria da Otimização da Topologia no ANSYS Workbench.....	50

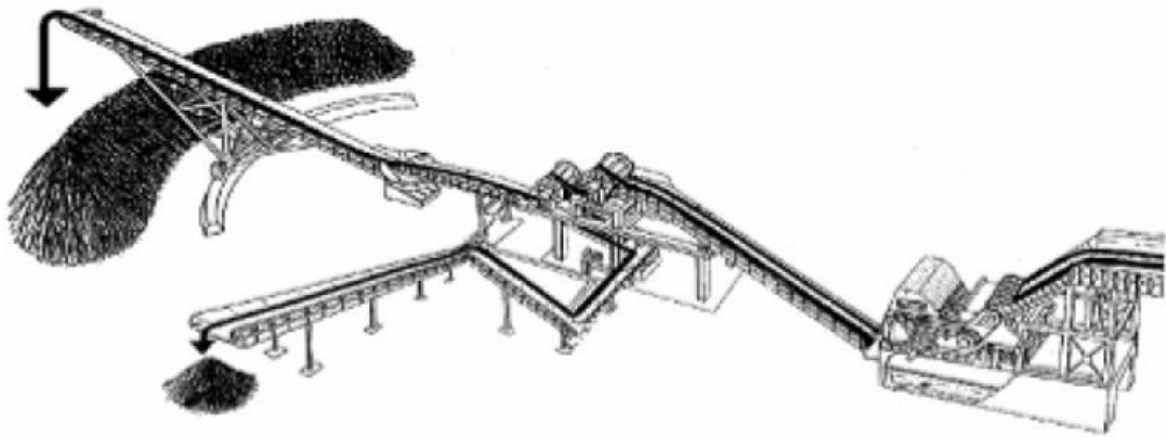
SUMÁRIO

5.3	Formulação do Problema de Otimização Topológica – ANSYS Workbench.....	51
5.4	Acoplamento da Análise Estática a Otimização Topológica – ANSYS Workbench.....	51
5.5	Procedimento de Otimização Topológica – Metodologia ANSYS Workbench	52
5.6	Refinamento Geométrico – Projeto CAD	58
6.	Validação do Modelo Otimizado por MEF – ANSYS Workbench.....	63
6.1	Magnitude Equivalente de Deformação Elástica (Modelo Otimizado).....	65
6.2	Deformação Total (Modelo Otimizado).....	66
6.3	Tensão Equivalente (Von – Misses) – (Modelo Otimizado).....	67
6.4	Variação da Tensão – Análise 1 do Processo de Trituração (Aço Manganês).....	68
6.5	Variação da Tensão (Aço Manganês X Aço Nano Bainítico).....	70
7.	Resultados e Discussões	74
8.	Conclusão	75
9.	Referência Bibliográfica	76

1 - Introdução

A indústria metalúrgica consome grandes quantidades de energia e materiais e é responsável pela produção de um considerável volume de resíduos sólidos. Nas usinas semi-integradas, a matéria-prima principal é a sucata e a fusão é realizada por meio do uso de energia elétrica. Os trituradores de sucata, conhecidos como "Shredders", foram desenvolvidos para atender à demanda de processamento de sucata de forma eficiente, com alta produtividade e reduzido impacto ambiental Mourão (2007). Os martelos do triturador trabalham em condições extremamente adversas e facilmente apresentam falhas, Brusa (2014). O ajuste e a troca frequente de martelos do triturador têm um impacto adverso na eficiência de trituração e no custo de trituração. Essas ferramentas desempenham um papel fundamental em diversas indústrias, como a metalúrgica, reciclagem e construção, permitindo a redução do tamanho e a destruição de materiais sólidos. Portanto, é urgente encontrar martelos adequados, a fim de melhorar a eficiência de trituração e prolongar a vida útil.

Figura 01: Arranjo Geral Shredder



Fonte: CIUCCIO, (2004)

Smith (2019), afirma que os martelos de Shredder têm sido amplamente utilizados na indústria por terem a capacidade de fragmentar e triturar materiais sólidos em processos de reciclagem e reaproveitamento mais eficientes. O processo de cominuição de sucata de metal em trituradores de martelos tem recebido grande atenção. Estudos experimentais têm dividido esse processo em quatro estágios sucessivos para uma melhor compreensão. No primeiro estágio, ocorre a remoção dos fragmentos da alimentação. No segundo estágio, os fragmentos sofrem deformação distinta, porém não se quebram. Em seguida, no terceiro estágio, os

fragmentos são quebrados em pequenos pedaços. Por fim, no último estágio, os fragmentos são ainda mais compactados Kircher (1999) e Brusa (2014).

Pesquisas adicionais têm se concentrado em fornecer uma explicação mais clara sobre o primeiro estágio do processo de cominuição de metais de paredes finas Sander (2004). Esses estudos têm contribuído para uma melhor compreensão dos fragmentos resultantes da trituração de bens em fim de vida e também para entender a influência dos parâmetros operacionais na qualidade da sucata triturada Li et. all (2013). É importante ressaltar que os martelos desempenham um papel essencial nesse processo de cominuição. Eles são responsáveis por aplicar os impactos necessários para reduzir o tamanho dos materiais e aumentar a densidade volumétrica, permitindo a separação e recuperação eficientes dos componentes da sucata. O estudo desses estágios e dos parâmetros operacionais relacionados aos martelos de trituradores de sucata contribui para otimizar o desempenho desses equipamentos, melhorando a eficiência e a qualidade do processo de trituração.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o princípio da fragmentação e trituração de materiais utilizando os martelos Shredder. Além disso, pretende-se utilizar o software ANSYS para realizar análises estáticas e Otimização Topológica (OT) dos martelos Shredder, visando melhorar sua eficiência e desempenho. Para este fim, o software ANSYS foi usado para realizar uma análise estrutural estática e avaliar o comportamento dos martelos Shredder sob diferentes condições de contorno para obter informações precisas de tensão, deformação e deslocamentos na estrutura dos martelos permitindo assim, um análise detalhada de sua resistência e integridades estrutural.

Análise computacional de falhas e otimização favorece / permite que engenheiros e projetistas façam ajustes e melhorias antes mesmo da construção física, economizando tempo e recursos significativos. Dessa forma, a análise estrutural computacional desempenha um papel crucial na garantia da segurança, confiabilidade e eficiência dos projetos estruturais João (2020). Além disso, a OT está sendo aplicada com o objetivo de aprimorar a eficiência e o desempenho dos martelos Shredder reduzindo o peso e seu custo. Essa técnica consiste em encontrar a distribuição ideal de material na estrutura, eliminando áreas não essenciais e redistribuindo-as para as regiões que apresentam maior demanda estrutural. O objetivo da otimização topológica é alcançar uma configuração ótima que maximize a rigidez e minimize o peso do martelo Shredder, mantendo suas propriedades mecânicas projetadas. Normalmente, nos processos de OT utiliza-se como critérios de remoção de material a tensão Máxima de von Mises ou a Compliance.

Existem diversos métodos de OT, como o Evolução Estrutural Orientada (ESO, do inglês Evolutionary Structural Optimization) e o Evolução Estrutural Simplificada (SESO, do inglês Smoothing Evolutionary Structural Optimization) Simonetti et al. (2013,2014). Esses métodos se baseiam em remoção de materiais ineficientes para a estrutura e buscam encontrar soluções ótimas estacionárias viáveis para projetos estruturais. Ambos os métodos de OT têm sido amplamente utilizados em diversos campos da engenharia, incluindo a otimização de projetos de componentes e estruturas para melhorar a eficiência e o desempenho.

Por fim, uma análise de falhas é crucial para melhorar o desempenho e a vida útil dos martelos do Shredder de sucata. O software ANSYS Workbench é utilizado para simular e analisar as condições de operação, aplicando conceitos de mecânica dos materiais, desgaste e resistência ao impacto. Os martelos Shredder são uma solução eficiente para fragmentação e trituração de materiais, com base na colisão de martelos rotativos de alta velocidade. Isso permite a redução do tamanho e destruição de materiais sólidos, contribuindo para a reciclagem, reaproveitamento e redução do impacto ambiental.

2 - Mecânica dos Materiais

Para Beer et al. (2017) a mecânica dos materiais é essencial para a solução de problemas de engenharia que envolvem a análise e o projeto de estruturas submetidas a cargas estáticas ou dinâmicas. Ela fornece um conjunto de ferramentas analíticas e conceitos que permitem determinar as tensões, deformações e deflexões em um corpo deformável sob a ação de forças externas.

A compreensão dos princípios da mecânica dos materiais é essencial para diversos campos da engenharia, incluindo a engenharia civil, mecânica, aeroespacial, naval, entre outras. Ela nos permite entender como os materiais respondem às cargas aplicadas, desde pequenas deformações elásticas até o ponto de falha e ruptura. No caso dos martelos Shredder, os principais conceitos envolvidos são tensão, deformação e fadiga.

- **Tensão:** É a medida da força interna vivida em um material por unidade de área (Beer et al., 2017). Os martelos Shredder estão sujeitos a força de impacto e que podem causar falhas.
- **Deformação:** Refere-se à mudança no tamanho ou forma de um material em resposta à tensão resultante da força aplicada Beer et al. (2017). Deformações excessivas podem levar à falha do martelo.
- **Fadiga:** Ocorre quando um material é submetido a cargas cíclicas repetidas, causando falha prematura Suresh (1998). Os martelos Shredder estão sujeitos a fadiga devido aos repetidos toques durante a operação.

2.1 Desgaste

Desgaste é o processo de remoção gradual de material da superfície de um corpo sólido devido a ação mecânica Hutchings (1992). Os martelos Shredder estão sujeitos a desgaste por abrasão e impacto devido ao contato com os materiais a serem processados. O desgaste abrasivo e por impacto são dois eventos comuns que ocorrem em martelos trituradores para sucata, devido às condições de operação diversas e ao contato repetitivo com os materiais a serem fragmentados.

- **Desgaste abrasivo:** O desgaste abrasivo ocorre quando partículas duras e irregulares entram em contato com a superfície dos martelos trituradores, causando em atrito e remoção gradual do material. Esse tipo de desgaste é influenciado por fatores como

dureza e abrasividade dos materiais que são fragmentados, velocidade de impacto e pressão de contato.

- **Desgaste por impacto:** O desgaste por impacto ocorre devido a cargas de choque e impacto que os martelos trituradores experimentam durante o processo de trituração. Essas cargas repentinas e de alta intensidade causam deformação plástica e fratura localizada na superfície dos martelos, causando em desgaste e eventual falha do martelo.

Para mitigar o desgaste abrasivo e por impacto, várias estratégias podem ser adotadas, como a seleção de materiais mais resistentes ao desgaste, o uso de revestimentos protetores, a otimização do design dos martelos e aplicação de tratamentos térmicos e revestimentos. Estudos experimentais e simulações numéricas são frequentemente usados para avaliar o desempenho dos martelos trituradores e identificar medidas de melhoria.

2.2 Resistência ao Impacto

A resistência ao impacto é a capacidade de um material absorver energia durante a deformação plástica sem falhar Callister & Rethwisch (2018). Os aços manganês austeníticos são comumente usados em martelos Shredder devido à sua alta resistência ao impacto Cavies (2005). A resistência ao impacto é especialmente relevante em martelos trituradores, pois esses componentes estão sujeitos a impactos repetitivos e de alta intensidade durante o processo de trituração. Materiais com boa resistência ao impacto são capazes de absorver a energia do impacto e dissipá-la, minimizando danos e prolongando a vida útil do martelo.

Uma das medidas comumente utilizadas para avaliar a resistência ao impacto de um material é o ensaio de impacto Charpy. Nesse ensaio, uma amostra do material é observada a um impacto brusco em uma máquina de ensaio específica, medindo-se a intensidade de energia dissipada na amostra até a sua fratura. O valor da energia sentida é uma indicação da resistência ao impacto do material.

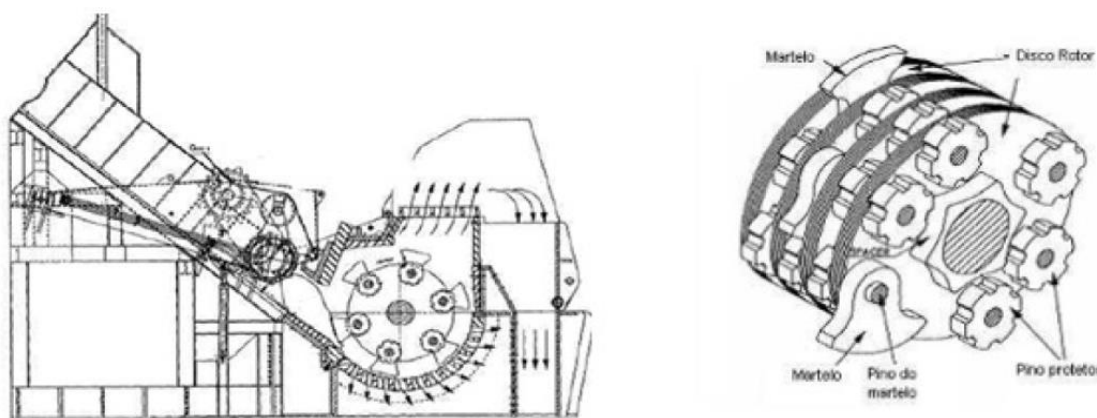
Para martelos trituradores de sucata, é essencial selecionar materiais com alta resistência ao impacto para garantir sua durabilidade e vida útil. Materiais como aços de alta resistência, como o aço manganês austenítico (ASTM A128) ou o aço endurecido (ASTM A514), são muito utilizados devido à sua combinação de resistência mecânica e tenacidade.

Fischer (2010) menciona que a resistência ao impacto é uma propriedade mecânica importante para materiais que são tolerantes a cargas de choque, como partes de máquinas, ferramentas e estruturas submetidas a cargas de impacto.

2.3 Material Alternativo

Estudos recentes têm explorado o uso de aços nano bainíticos em martelos Shredder devido às suas excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência à tração e ductilidade Caballero et al. (2013).

Figura 02: Sistemas de Rolos de Alimentação Montagem dos Martelos do Shreder



Fonte: JODY et al. (2006)

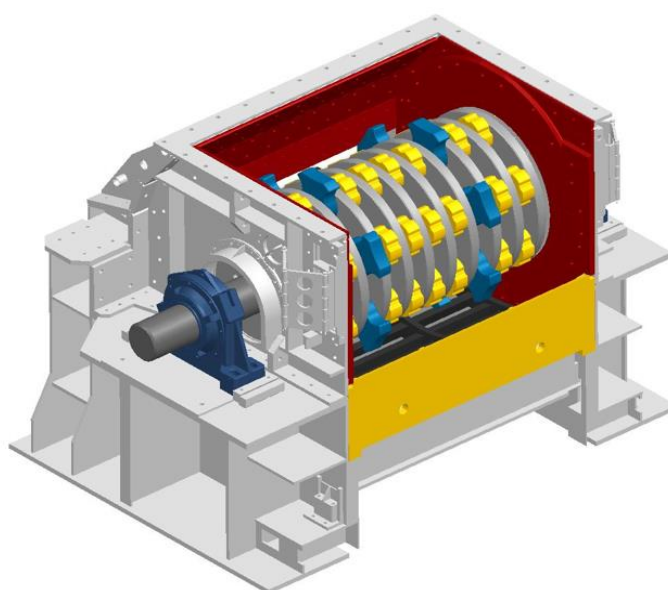
Os trituradores de sucata metálica são amplamente utilizados na indústria de reciclagem, e trituram diversos tipos de sucatas de aço tais como: Carroceria de automóveis, fogão a gás, geladeira e máquina de lavar sendo uma ampla gama de diferentes materiais. Tais sucatas precisam ser convertidas em pedaços menores, isso ocorre com a ajuda de martelos (conforme figura 02), a máquina Shredder tritura as sobras em pedaços menores e homogêneos, e então são realizadas suas operações de triagem usando suas propriedades magnéticas. Os martelos estão, portanto, severamente sujeitos a desgaste e impactos mecânicos. Infelizmente, o desempenho dos aços manganês austeníticos não é sempre o ideal, e em alguns casos fraturas podem ocorrer juntamente com o desgaste prematuro do componente, a fadiga nesse cenário pode ocasionar essas fraturas, tais eventos podem ser menos prováveis no caso de uma operação normal ou seja, aquela que respeita as recomendações dos fabricantes.

A fratura do martelo resultará em uma parada no procedimento para abri-lo e recolocá-lo. A pausa em qualquer estágio pode causar prejuízos financeiros. Assim, encontrar os fatores que causam a fratura de martelo e resolvê-los é importante. A teoria sobre os martelos

Shredder envolve a compreensão de seu funcionamento, materiais utilizados e aspectos de desgaste e falhas. A seguir destaca-se os pontos principais dessa teoria:

- **Mecanismo de cominuição:** O mecanismo de cominuição nos trituradores de martelo envolve a trituração e fragmentação de materiais por meio de impacto e cisalhamento. Os martelos Shredder são projetados para lidar com efeitos repetidos e cargas cíclicas durante a trituração Schubert (2001) ver figura 03.
- **Seleção de materiais:** A seleção adequada de materiais para os martelos Shredder é crucial para garantir uma vida útil longa e reduzir a frequência de manutenção. Aços manganês austeníticos são comumente utilizados devido às suas boas propriedades de resistência ao impacto e desgaste Dogan et al. (2007). No entanto, pesquisas recentes têm explorado o uso de aços nano bainíticos como uma alternativa devido às suas propriedades superiores.
- **Desgaste e falhas:** Os martelos Shredder estão sujeitos a desgaste abrasivo, adesivo e erosivo, além de falhas por fadiga e fratura. A compreensão desses interruptores de desgaste e falha é essencial para otimizar o projeto e a manutenção dos martelos Sugarman et al. (2002).

Figura 03: Vista Parcial Câmara de Trituração do Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

A aplicação de aços nano-bainíticos livres de carboneto (CFB) em martelos para Shredder representa uma alternativa promissora aos aços manganês austeníticos tradicionalmente utilizados. Os aços CFB apresentam uma microestrutura refinada, com uma combinação de alta resistência e ductilidade, proporcionando excelente resistência ao desgaste e ao impacto. A ausência de carbonetos na microestrutura também minimiza a formação de trincas e contribui para uma maior vida útil dos martelos Caballero et al.(2013) e Mateo et al. (2014).

Os aços nanobainíticos possuem uma microestrutura refinada e livre de carbonetos, o que proporciona uma combinação única de alta resistência e tenacidade. Esses recursos tornam os aços CFB ideais para aplicações em martelos Shredder, onde o desempenho em condições de alto impacto e desgaste é crucial.

Nos últimos anos, novos aços nano-bainíticos livres de carboneto (CFB) foram introduzidos no mercado, a microestrutura dos aços CFB, incluindo ferrita bainítica e austenita retida, tem se mostrado estável. A tenacidade à fratura dos aços CFB está na faixa de 100-160 MPa e sua resistência à tração estão acima de 1,5 GPa. Em termos de propriedades de desgaste, eles também têm um melhor desempenho ou semelhantes aos dos aços manganês austeníticos. Como os martelos trituradores de manganês austeníticos em condições de trabalho estarão sujeitos à falha precoce e degradação conseqüentemente, os aços CFB parecem ser uma boa alternativa para o aço manganês austenítico em martelos trituradores. As técnicas aqui empregadas buscam identificar os principais fatores que influenciam a fratura de aços manganês austeníticos. Diante das anomalias identificadas, foi proposta uma solução por meio da substituição dos martelos convencionais pelo Martelo de aço CFB. Essa abordagem visa aprimorar a resistência e eficiência do processo, visando a prevenção de fraturas e a melhoria geral do desempenho. Além disso, otimização topológica é usada como ferramenta para diminuir o peso do Martelo, tornando-o mais leve e mantendo a sua rigidez. Deste modo, entende-se que está contribuição significativa deste estudo para a indústria no contexto global.

Os aços nano-bainíticos livres de carboneto (CFB) apresentam características químicas únicas que os tornam promissores para aplicação em martelos para Shredder. A composição desses aços geralmente inclui uma quantidade relativamente alta de silício, enquanto outros elementos como manganês, cromo, molibdênio e vanádio também podem ser adicionados para melhorar as propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste. A ausência de carbonetos na microestrutura é um aspecto importante desses aços.

A alta concentração de silício nos aços nano-bainíticos é responsável pela mistura de carbonetos, o que resulta em uma microestrutura livre de carbonetos. Esta microestrutura

refinada, composta por bainita e martensita retida, proporciona uma combinação de alta resistência e ductilidade, oferecendo excelente resistência ao impacto e ao desgaste Caballero et al. (2013) e Mateo et al. (2013).

É importante notar que uma composição química específica pode variar dependendo das propriedades desejadas e das condições de aplicação. A otimização da composição química e do tratamento térmico dos aços nano-bainíticos pode levar a um melhor desempenho em aplicações como martelos para Shredder Caballero et al. (2013) e Mateo et al. (2013).

Uma composição química típica de aços nano-bainíticos livres de carboneto pode ser a seguinte:

- Carbono (C): 0,6 - 1,0%
- Silício (Si): 1,5 - 3,0%
- Manganês (Mn): 1,0 - 2,0%
- Cromo (Cr): 0,5 - 2,0%
- Molibdênio (Mo): 0,1 - 0,5%
- Vanádio (V): 0,1 - 0,3%
- Alumínio (Al): 0,01 - 0,1%
- Fósforo (P) e Enxofre (S): $\leq 0,035\%$ (valores máximos)

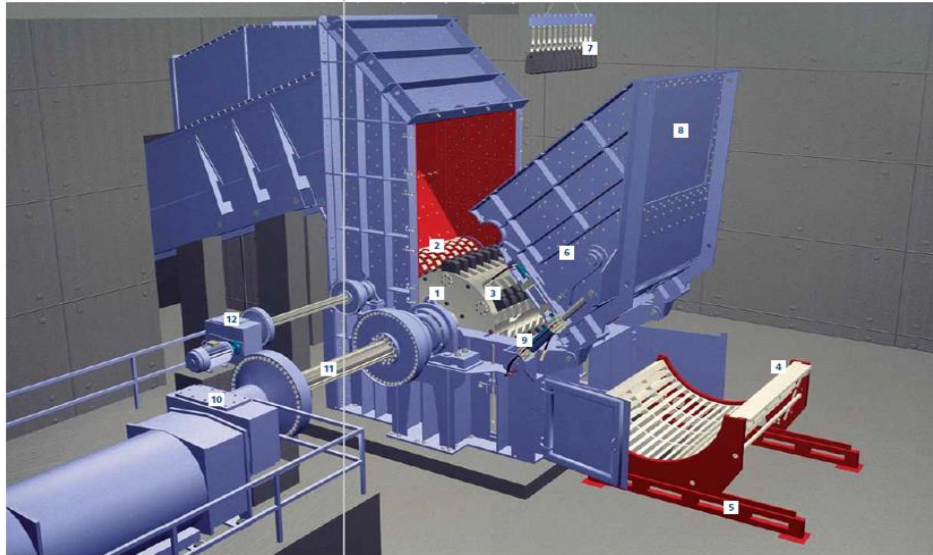
Vale ressaltar que as proporções exatas dos elementos de liga podem variar de acordo com a aplicação específica e as propriedades desejadas. Assim características químicas dos aços nano-bainíticos CFB resultam em uma microestrutura que consiste em placas finas de bainita com uma matriz de austenita retida. A ausência de carbonetos na microestrutura proporciona uma maior resistência ao desgaste, especialmente em aplicações de alto impacto, como martelos para Shredder Caballero et al. (2013) e Mateo et al. (2013).

3 - Descrição dos Materiais

Os martelos trituradores são geralmente produzidos em aço austenítico manganês (conforme **DIN 1.3401** padrão) em vários pesos por métodos de fundição. Microestrutura de aço manganês austenítico consiste em austenita e carbonetos de grãos após a fundição. A existência de carbonetos na estrutura é prejudicial e reduz as propriedades mecânicas e, finalmente, a fratura do martelo. Para remover carbonetos, o recozimento de solução é usado a 1100 °C por 4,5 horas (de acordo com a espessura do martelo) e são temperados em água para evitar a precipitação de carbonetos.

Os martelos serão instalados na máquina Shredder. O dispositivo triturador estudado foi o **FLSMIDTH Hammer Crush EV 150x200** ver figura 4, que trabalhou a 6.000 cavalos de potência com 12 martelos para moer sucatas metálicas (ver figura 04).

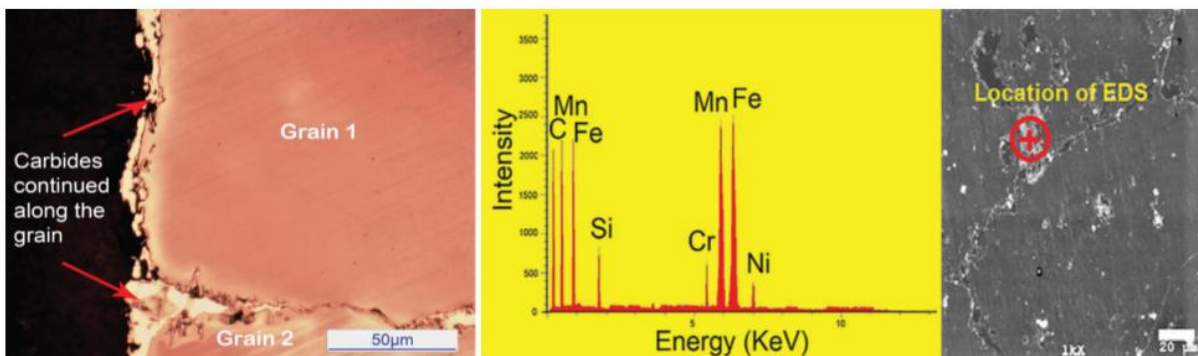
Figura 04: EV Hammer Impact Crusher



Fonte: Catálogo de Produto FLSMIDTH, (2023)

No processo de moagem de sucatas, os martelos trituradores e a câmara trituradora são submetidos a inspeções periódicas. Nesse estudo, 6 de 12 dos martelos foram submetidos a desgaste anormal ou fraturados. Estes martelos que sofreram falhas são peças fabricadas em ferros fundidos austeníticos de manganês. A microscopia óptica foi usada para fractografia e microscopia eletrônica de varredura (MEV) com análise química de difração de raios X espectroscopia (EDS) foram usadas para examinar a composição química das superfícies de fratura.

Figura 05: Análise Metalográfica Aço Austenítico Manganês e Varredura (MEV) / (EDS)



Fonte: Laboratorio Magotteaux Brasil, (2023)

O processo de manufatura dos martelos por fundição foi simulado no software **Click2Cast** e feita a análise por **FEM** no **ANSYS WORKBENCH**, respectivamente, para melhor identificar os problemas de produção e deficiências dos martelos. A análise química desses martelos por espectrometria de emissão óptica é apresentado na Tabela 1. Observe que as porcentagens exatas podem variar dependendo da composição específica da liga e dos requisitos da aplicação. A tabela abaixo fornece uma comparação geral entre as composições de martelos de aço manganês austenítico e martelos de aço **CFB**.

Tabela 1: Composição Química do Martelo de Aço Manganês Austenítico e Aço CFB

Elemento	Aço Manganês Austenítico (%)	Aço CFB (%)
Carbono (C)	1,0 - 1,3	0,8 - 1,0
Manganês (Mn)	12 - 14	1,5 - 2,5
Silício (Si)	0,3 - 0,5	1,5 - 2,0
Cromo (Cr)	0 - 1,0	0,5 - 1,5
Molibdênio (Mo)	0 - 0,5	0,2 - 0,5
Vanádio (V)	0 - 0,2	< 0,2
Alumínio (Al)	0 - 0,1	< 0,1
Níquel (Ni)	0 - 1,0	< 0,5
Cobre (Cu)	0 - 0,5	< 0,3

Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

A seguir, o aço bainítico isento de carboneto de **DIN WN 1.6511 + 2Si** foi usado para substituir o aço manganês austenítico. Corpos de prova de ambas as análises relacionadas ao aço manganês austenítico e aços bainíticos isentos de carboneto pela composição química listada na **Tabela 1** foram fundidos de acordo com o padrão **ASTM A 350**. Amostras de aço manganês austenítico foram solubilizadas no temperatura de 1100° C e, em seguida, resfriadas em água, e amostras bainíticas livres de carboneto foram preparadas usando a operação de austêmpera a 300 °C. Testes de tração, impacto e dureza em ambas as séries de amostras foram realizadas de acordo com os padrões **ASTM E8**, **E23** e **E10**, respectivamente. O penetrador de teste Brinell tinha 10 mm de diâmetro e força de teste de 3000 kgf.

- O aço bainítico isento de carboneto de **DIN WN 1.6511 + 2Si** é um tipo específico de aço nano-bainítico com adição de silício. Sua composição química é projetada para promover a formação de bainita sem a presença de carbonetos, o que resulta em propriedades mecânicas superiores e maior resistência ao desgaste. (ver tabela 2 para a aplicação específica ao teste realizado).

Tabela 2: Composição Química Aço Nano - Bainítico DIN WN 1.6511 + 2Si

Elemento	Porcentagem (%)
Carbono (C)	0,38 - 0,43
Silício (Si)	1,8 - 2,2
Manganês (Mn)	0,5 - 0,8
Cromo (Cr)	0,9 - 1,2
Níquel (Ni)	1,4 - 1,8
Molibdênio (Mo)	0,15 - 0,25
Vanádio (V)	0,1 - 0,2

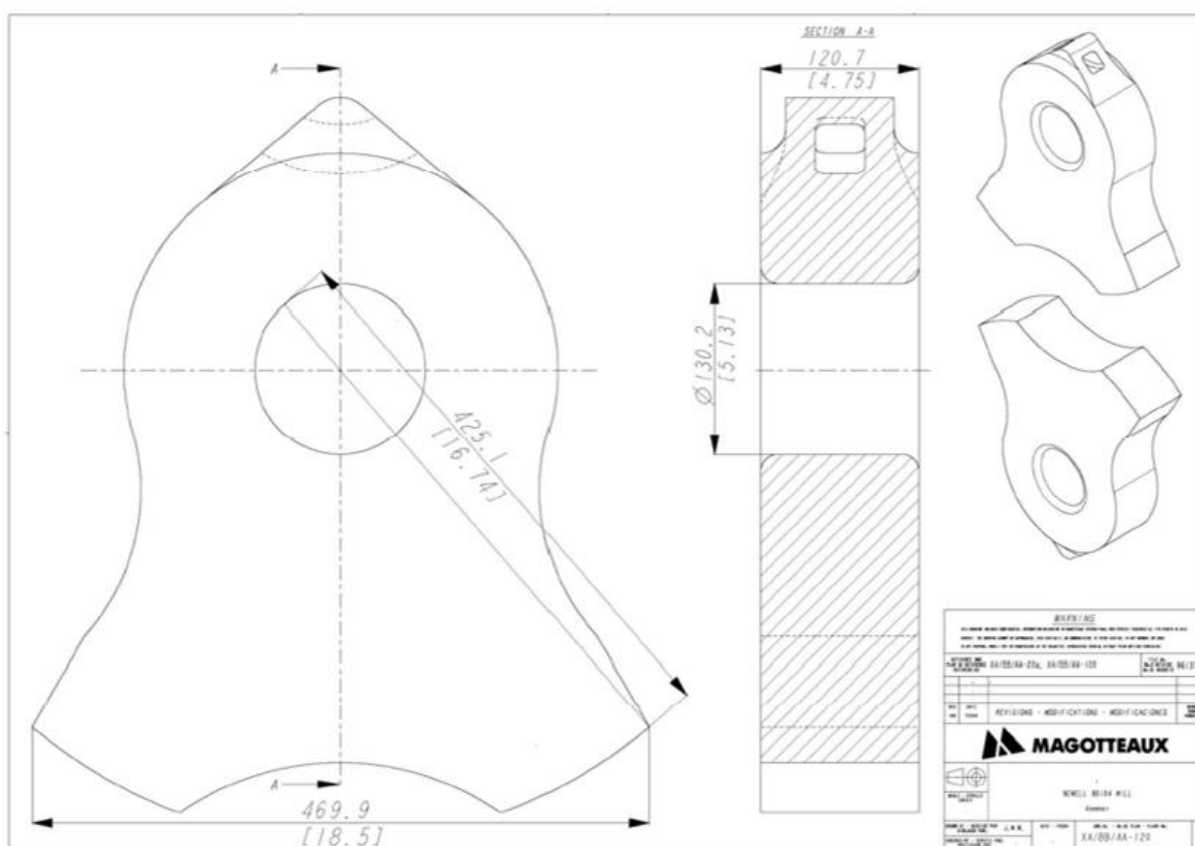
Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

- Observe que as porcentagens exatas podem variar dependendo da composição específica da liga e dos requisitos da aplicação. A adição de silício nesta liga ajuda a estabilizar a bainita e austenita retida na microestrutura, além de aumentar a resistência ao desgaste.
- O aço bainítico isento de carboneto de **DIN WN 1.6511 + 2Si** é uma opção promissora para a fabricação de martelos Shredder devido à sua alta resistência ao desgaste, resistência ao impacto e vida útil prolongada em comparação com os aços manganês austeníticos tradicionais.

O teste de abrasão foi realizado de acordo com a norma **ASTM G99**. A pressão normal aplicada foi de 152 Mpa e a velocidade de rotação do disco foi 0,1 m/s. No teste de campo, 22 martelos foram feitos de aço bainítico sem carboneto **DIN WN 1.6511 + 2Si** e em quatro períodos de tempo e em cada período, 8 desses tipos de aços foram instalados aleatoriamente com martelos de aço manganês austenítico em diferentes lugares do triturador para verificá-los em reais condições. Em cada um desses intervalos, a taxa de desgaste e as trincas superficiais foram consideradas várias vezes, e os resultados foram comparados entre si.

Martelos: Os martelos são presos ao rotor e giram com ele. Eles impactam a sucata metálica enquanto ela passa pelo triturador, triturando-a em pedaços menores. A figura 06 apresenta um desenho esquemático que é apenas uma representação simplificada de um martelo que trabalha para triturar sucata metálica e pode variar dependendo do desenho específico e do fabricante do triturador.

Figura 06: Desenho Base do Martelo Aplicado - Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

4 - Métodos Experimentais Para Obtenção de Dados

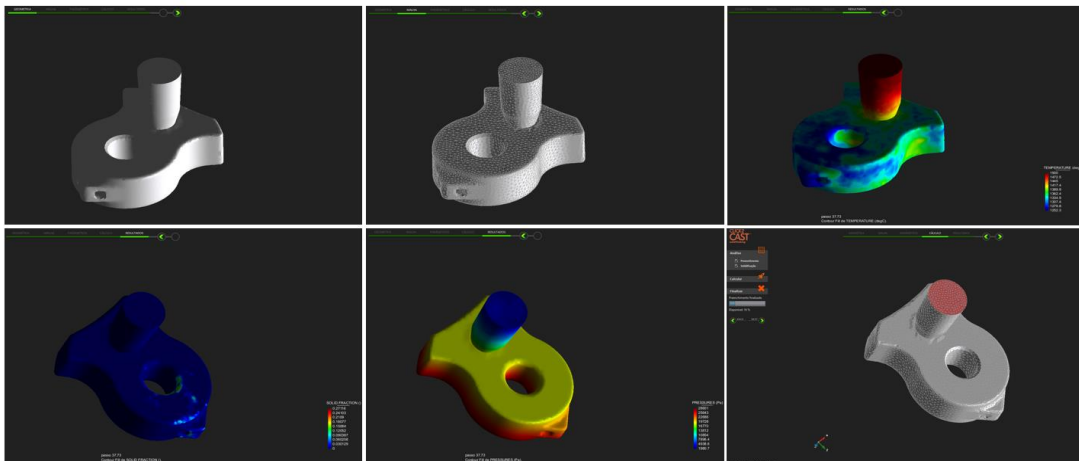
Os métodos experimentais desempenham um papel fundamental na obtenção de dados empíricos confiáveis e na validação de teorias científicas. Nesta seção, será apresentada a estratégia utilizada para realizar essas investigações necessárias com base em experimentos cuidadosamente planejados, buscou-se através das simulações obter informações relevantes sobre os fatores que afetam a fratura de aços manganês austeníticos, permitindo soluções eficazes.

4.1 Simulação do Processo de Fundição

A simulação do processo de fundição de martelos para Shredder é uma etapa essencial para garantir a eficácia e o desempenho desse componente crucial na indústria de reciclagem. Utilizando o software Click2Cast, é possível obter resultados precisos ao definir corretamente os parâmetros de entrada. Nesta seção, abordaremos os principais aspectos que devem ser cuidadosamente configurados antes da execução da simulação.

- **Modelo CAD:** Importe o modelo CAD 3D do martelo para Shredder no software Click2Cast. Certifique-se de que o modelo seja completo e inclua todos os detalhes necessários, como dimensões, espessuras e características de design.
- **Processo de fundição:** Selecione o processo de fundição mais adequado para o martelo, como fundição em areia, fundição em molde de aço ou fundição por gravidade. As propriedades e características específicas do processo devem ser configuradas de acordo.
- **Material:** Escolha o material adequado para o martelo, como aço austenítico manganês ou aço nano-bainítico isento de carboneto. As propriedades físicas, térmicas e mecânicas do material selecionado devem ser fornecidas ao software.
- **Malha:** Gere uma malha de elementos finitos para o modelo CAD. É importante garantir que a malha seja de boa qualidade e tenha refinamento suficiente nas áreas críticas para obter resultados precisos
- **Condições de contorno:** Defina as condições de contornos congelados para a simulação, como temperatura inicial do líquido metálico, temperatura ambiente, taxa de resfriamento e condições de troca de calor entre as superfícies.
- **Parâmetros do processo:** Configure os parâmetros específicos do processo de fundição, como temperatura de vazamento, tempo de vazamento, velocidade de enchimento e pressão de injeção (se aplicável).
- **Controle de qualidade:** Defina os critérios de controle de qualidade, como porosidade máxima aceitável, rechupes, trincas e distorções. Isso ajuda a identificar áreas problemáticas no projeto e no processo de fundição.

Figura 07: Configuração da Simulação Para o Processo de Fundição do Martelo - Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil (2023)

Ao configurar corretamente esses parâmetros de entrada, a simulação no Click2Cast fornecerá resultados precisos e úteis, ajudando os engenheiros a otimizar o processo de fundação e fabricação de martelos para Shredder com maior qualidade e desempenho. Para o experimento tratado nesse trabalho foi considerado o Aço Manganês.

4.2 Parâmetros Analisados Para a Simulação do Processo de Fundição (Aço Manganês)

4.2.1 Formação de porosidade no processo de fundição (Niyama)

Niyama foi desenvolvido por Yoshio Niyama e seus colegas em 1982 para prever a formação de porosidade no processo de fundição. O Niyama é amplamente utilizado na indústria de fundições e em softwares de simulação, para avaliar a qualidade das peças fundidas.

O Niyama é baseado na relação entre o gradiente térmico (**G**) e a taxa de resfriamento (**R**) durante a solidificação de uma peça fundida. O valor de Niyama (**N**) é calculado como:

$$N = \frac{G}{\sqrt{R}} \quad (1)$$

Onde **G** é o gradiente térmico e **R** é a taxa de resfriamento. O Niyama é usado para identificar áreas de risco de porosidade na peça fundida. Valores mais altos de Niyama indicam uma qualidade melhor da peça, com menor probabilidade de porosidade, enquanto valores mais baixos sugerem um risco maior de porosidade.

Ao usar o Niyama, os engenheiros podem otimizar o projeto e o processo de fundação para minimizar a porosidade e melhorar a qualidade da peça.

4.2.2 Formação de Porosidade em %

A porosidade é geralmente resultado de gases aprisionados durante a solidificação ou de contração volumétrica do material à medida que ele se solidifica e resfria. Para quantificar a porosidade em termos percentuais é importante analisar os resultados da simulação e identificar as áreas onde a porosidade pode ocorrer.

Essa análise pode ser feita usando ferramentas de pós-processamento, como o software de análise de elementos finitos (FEA) ou programas de visualização de resultados.

4.2.3 Taxa de resfriamento

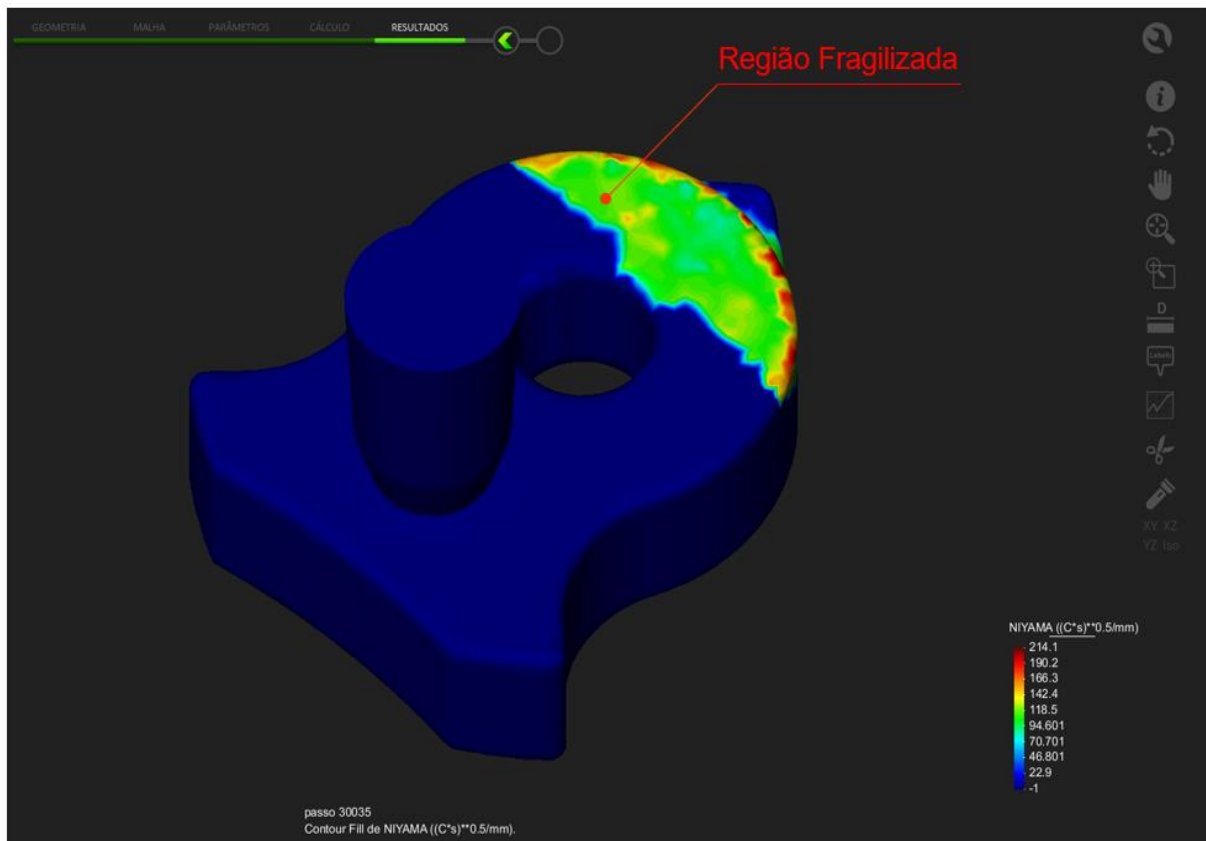
A taxa de resfriamento é um dos parâmetros críticos no processo de fundição, pois afeta diretamente a microestrutura e as propriedades mecânicas das peças fundidas. A taxa de resfriamento pode ser usada para identificar áreas de solidificação rápida ou lenta, que podem levar a defeitos de fundação, como porosidade, trincas ou segregação.

4.3 Análise Processo de Fundição Para o Aço Manganês no Ambiente de Simulação

4.3.1 Formação de Porosidade no Processo de Fundição (Niyama) – Análise de Resultado

Durante o processo de fusão e vazamento do metal líquido no molde, podem ocorrer reações químicas que liberam gases, como dióxido de carbono e monóxido de carbono. Se esses gases não forem adequadamente liberados ou escaparem rapidamente do molde, podem ficar aprisionados, formando porosidade. O que está demonstrado na figura 08 indica a fragilização durante a primeira etapa de simulação do processo de fundição.

Figura 08: Avaliação (Niyama) Martelo – Shredder

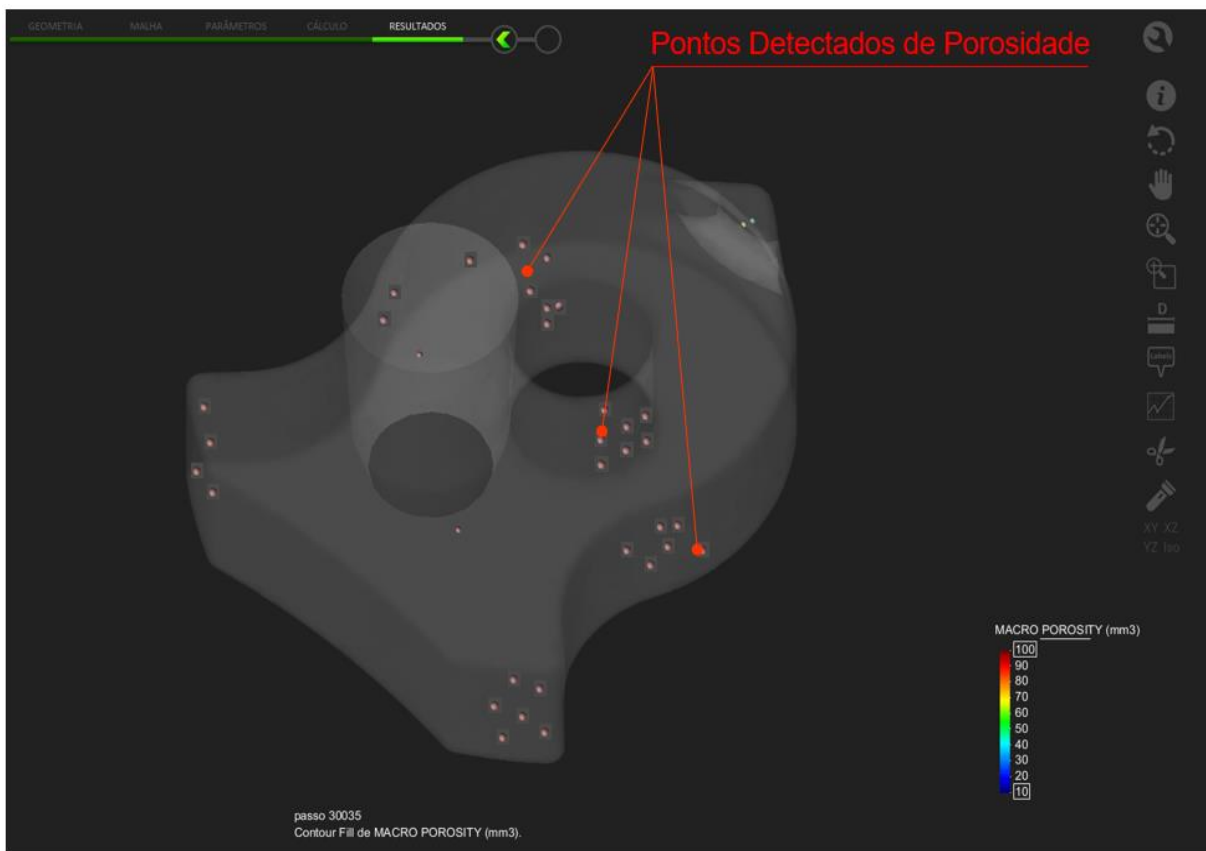


Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

4.3.2 Formação de Porosidade em % – Análise de Resultado

A escolha inadequada dos materiais do molde pode contribuir para a formação de porosidade. Por exemplo, se o molde não tiver uma boa permeabilidade ou se o aglomerante utilizado tiver uma alta taxa de liberação de gases, a porosidade pode ocorrer. A contaminação por Impurezas no metal líquido, como óxidos, sujeira ou umidade, podem levar à formação de porosidade durante o processo de fundição.

Figura 09: Avaliação (Porosidade em %) Martelo – Shredder

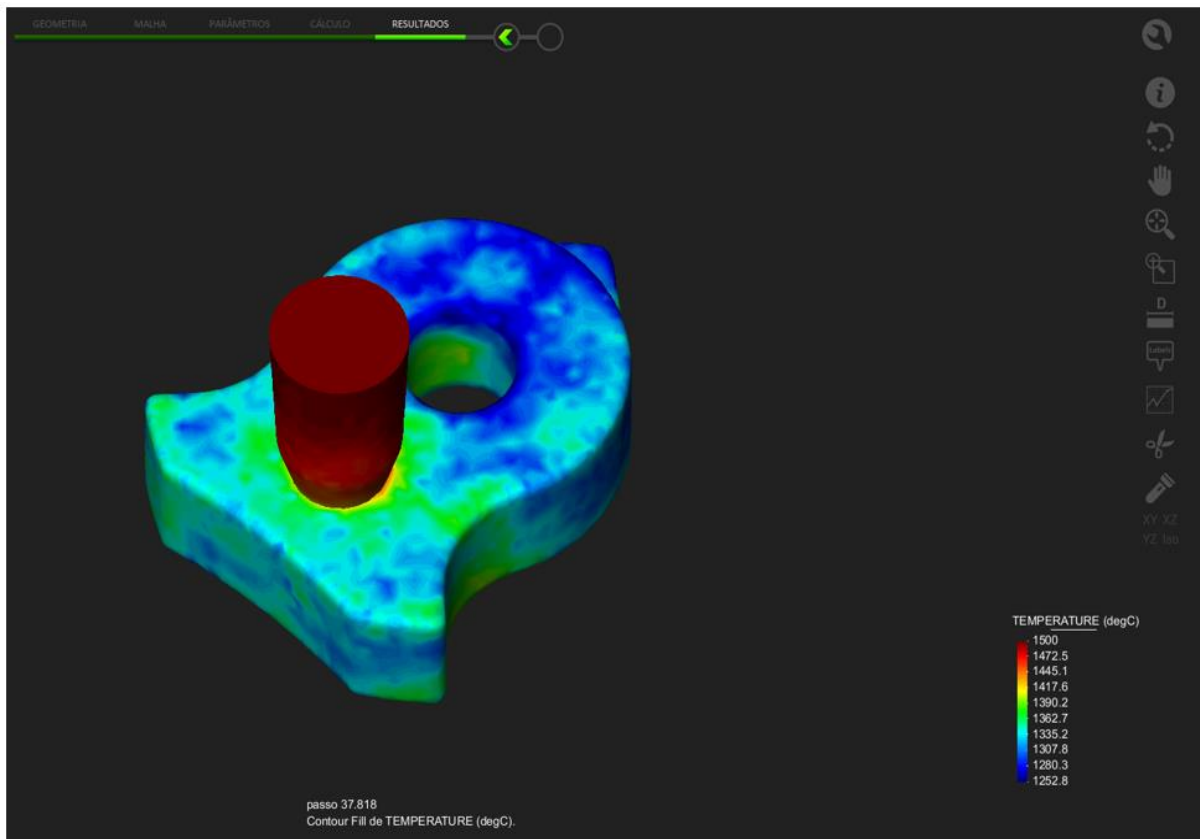


Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

4.3.3 Taxa de Resfriamento – Análise de Resultado

Um resfriamento muito rápido do metal fundido pode levar à formação de porosidade, pois não permite que os gases presentes sejam liberados corretamente. Da mesma forma, um resfriamento muito lento pode permitir a formação de grandes vazios. A taxa de resfriamento inadequada no processo de fundição de um martelo triturador de sucata pode resultar em problemas de qualidade e desempenho da peça fundida. A taxa de resfriamento refere-se à velocidade com que o metal fundido é resfriado e solidificado no molde.

Figura 10: Avaliação (Taxa de Resfriamento) Martelo - Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

No caso de um martelo triturador de sucata, é importante que a peça fundida seja resfriada de maneira adequada para garantir a sua resistência, durabilidade e integridade estrutural. Uma taxa de resfriamento muito rápida pode levar à formação de porosidade, trincas ou inclusões internas devido à contração do metal durante a solidificação. Por outro lado, uma taxa de resfriamento muito lenta pode resultar em grãos grosseiros e falta de homogeneidade na estrutura do material, tornando a peça mais suscetível a falhas mecânicas.

4.4 Análise de Falhas em Martelos para Shredder Hammer - ANSYS Workbench

A análise de falhas em martelos para Shredder Hammer é crucial para garantir sua durabilidade e eficiência no processo de trituração. Uma maneira de analisar falhas e identificar áreas de melhoria é usar o software de simulação de elementos finitos **ANSYS Workbench**. A análise estática é reguladora para avaliar a resposta dos martelos às cargas estáticas e determinar se as tensões e deformações excedem os limites de material.

Vale ressaltar que para análise a seguir devemos comparar os pontos de maior fragilidade indicados, em relação aos resultados da simulação anterior para o aço manganês.

Figura 11: Falha em Martelo – Shredder (120 horas de Trabalho)



Fonte: Cimentos Cielo Azul, (Uruguai - 2023)

A seguir, as etapas para realizar uma análise de falhas em martelos para Shredder Hammer usando o ANSYS Workbench:

- **Preparação do modelo:** Crie um modelo CAD do martelo para Shredder Hammer, incluindo todos os detalhes relevantes, como geometria, dimensões e localização das fixações.
- **Importação do modelo:** Importe o modelo CAD para o ANSYS Workbench e selecione o tipo de análise estática.
- **Definição do material:** Defina as propriedades do material para o aço manganês ou outros materiais relevantes, como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, densidade, resistência à tração e resistência ao escoamento.
- **Construção da Malha:** Definir uma malha de elementos finitos ao modelo, considerando elementos e tamanho de malha padrão para obter resultados precisos.

- **Condições de contorno:** Aplicar as condições de contornos, como restrições de movimento e forças aplicadas aos pontos de impacto e fixação do martelo. As forças aplicadas devem ser aceitas nas condições reais de operação do Shredder Hammer.
- **Domínio da Solução:** Resolver o problema de análise estática e observar a distribuições das tensões, deformações e deslocamentos no martelo no domínio da solução.
- **Avaliação dos resultados:** Os resultados são analisados para identificar áreas com tensão ou deformações excessivas que podem levar à falha do martelo. Verifique se as forças máximas estão abaixo dos limites de resistência à tração e resistência ao escoamento do material. Observe também a distribuição das deformações para identificar áreas com maior probabilidade de deformação plástica.
- **Otimização do projeto:** Quando identificadas áreas com potencial de falha, é importante realizar modificações no projeto do martelo para aprimorar sua resistência e durabilidade. Nesse sentido, é possível efetuar ajustes na geometria, espessuras, distribuição de massa ou selecionar materiais mais adequados. Para garantir a eficácia dessas melhorias, é recomendável repetir a análise estática conforme necessário, de forma a verificar e validar os resultados obtidos no projeto otimizado. Dessa maneira, poderemos assegurar um martelo mais robusto e confiável, capaz de atender aos requisitos de desempenho e oferecer maior segurança aos usuários.

4.5 Modelagem e Discretização das Forças Atuantes no Sistema de Martelos Shredder

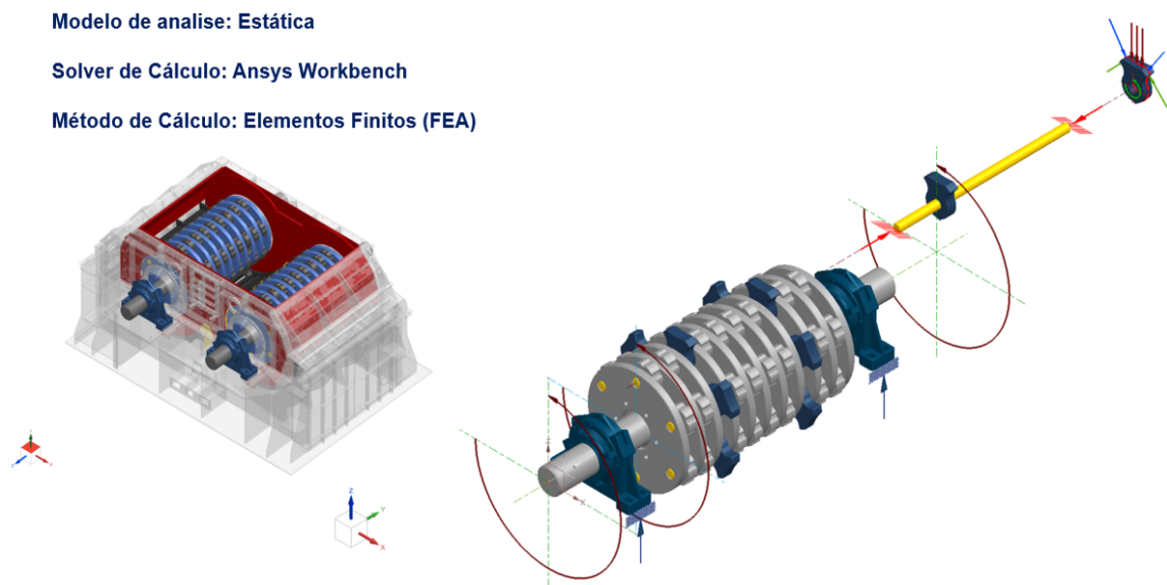
Para modelar as forças atuantes no sistema, foram empregados os seguintes meios: experimentos práticos e simulações computacionais. Combinando essas abordagens, podemos obter informações confiáveis sobre as cargas e tensões enfrentadas pelo martelo durante o uso, permitindo ajustes adequados na geometria, espessura, distribuição de massa e seleção de materiais para maximizar sua resistência e durabilidade. Assim, o projeto final resultará em um martelo mais eficiente e seguro para o desempenho no Shredder.

- **Medições experimentais:** Foram realizados testes em escala real e em escala reduzida de um Shredder com sensores de força e acelerômetros posicionados no martelo e nas áreas de impacto. Os sensores de força mediram as forças de impacto, enquanto os acelerômetros coletaram dados referentes à orientação do martelo durante o processo de trituração. A combinação desses dados permite estimar as forças atuantes no martelo.

- **Análise de vídeo:** Utilizou-se câmeras de alta velocidade para filmar o processo de trituração e, em seguida, analisar os vídeos para obter informações sobre a velocidade e o movimento do martelo e dos detritos. Essas informações, juntamente com o conhecimento das propriedades dos materiais e dinâmica do sistema, podem ajudar a estimar as forças de impacto no martelo.
- **Simulações de Elementos Discretos (DEM):** Simulações de elementos discretos com a plataforma Siemens Star CCM+ foram realizadas para modelar a interação entre o martelo e os detritos durante o processo de trituração. As simulações DEM forneceram informações específicas sobre as forças de impacto e o comportamento dinâmico do sistema.
- **Simulações de Elementos Finitos (FEM / FEA):** Realizada simulações de elementos finitos para modelar o processo de trituração, considerando as propriedades dos materiais, as condições de contorno e as forças de impacto. As simulações FEA podem fornecer informações sobre a tensão e deformações no martelo durante o processo de trituração e ajudar a estimar as forças atuantes.

Ao empregar uma combinação de métodos experimentais e simulações, foi possível coletar dados precisos sobre as forças atuantes no martelo para Shredder. Essas informações foram utilizadas para modelar o problema usando a plataforma ANSYS Workbench. Abaixo, apresento o modelo discretizado obtido a partir desses dados:

Figura 12: Arranjo Geral das Forças Atuantes no Sistema – Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil (2023)

Figura 13: Modelagem Matemática das Forças Atuantes no Sistema – Shredder

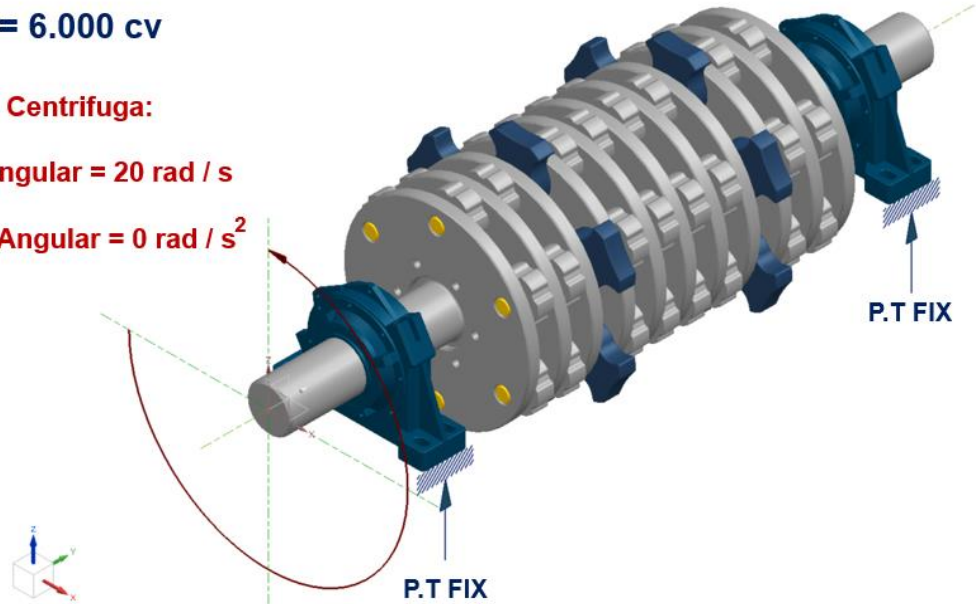
Diagrama de Forças Atuantes – Discretização do Sistema

Pot. = 6.000 cv

Força Centrífuga:

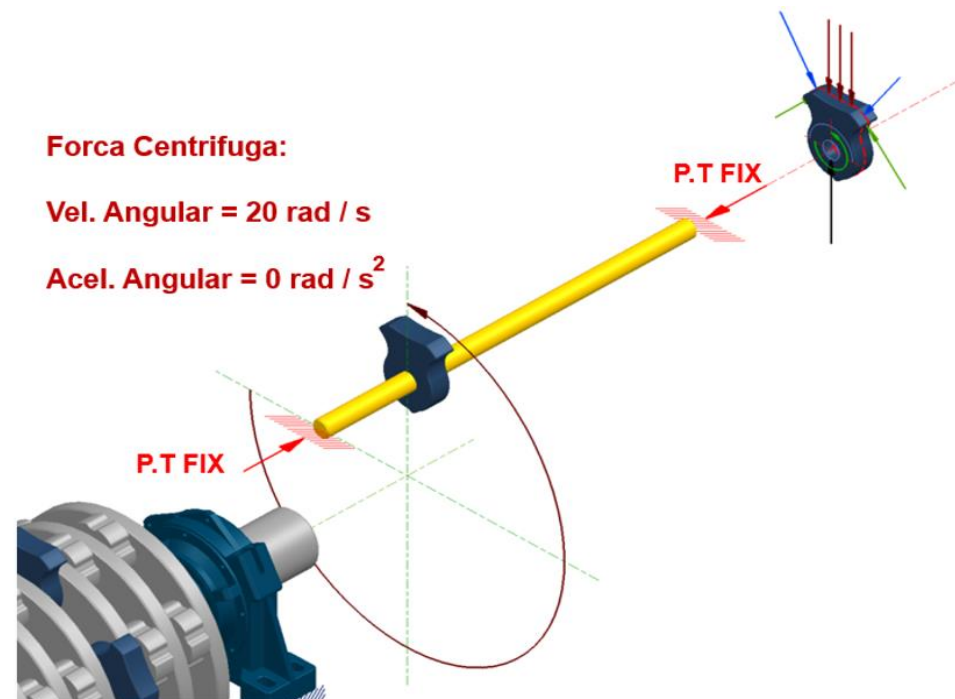
Vel. Angular = 20 rad / s

Acel. Angular = 0 rad / s²



Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

Figura 14: Modelagem Matemática das Forças Atuantes no Sistema – Shredder



Força Centrífuga:

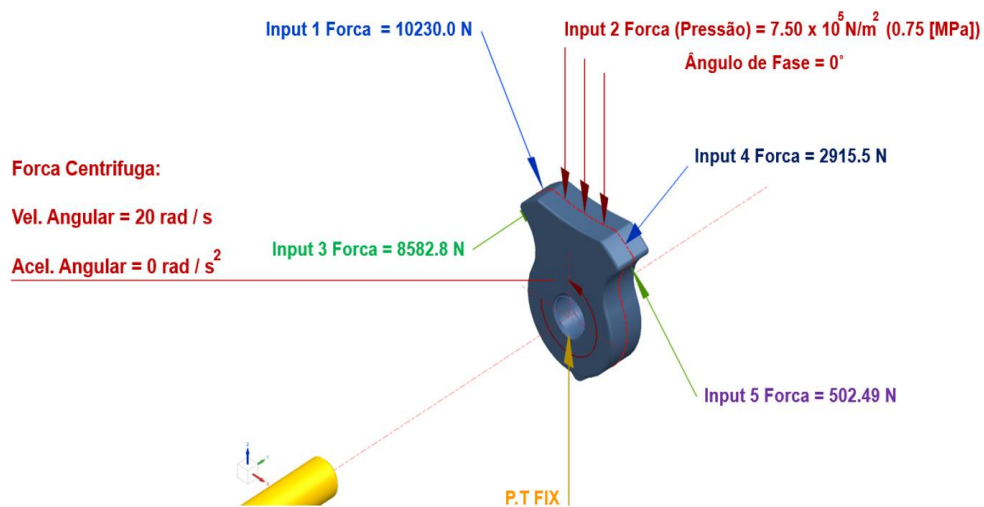
Vel. Angular = 20 rad / s

Acel. Angular = 0 rad / s²

Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

- **Identificação das forças atuantes no martelo triturador:** Isso pode incluir forças de impacto, forças de resistência e outras forças que experimentaram o desempenho do equipamento.
- **Definição das condições de contorno para a análise:** Isso inclui a fixação do martelo e as restrições de movimento que estão presentes na dinâmica de trabalho do martelo triturador.

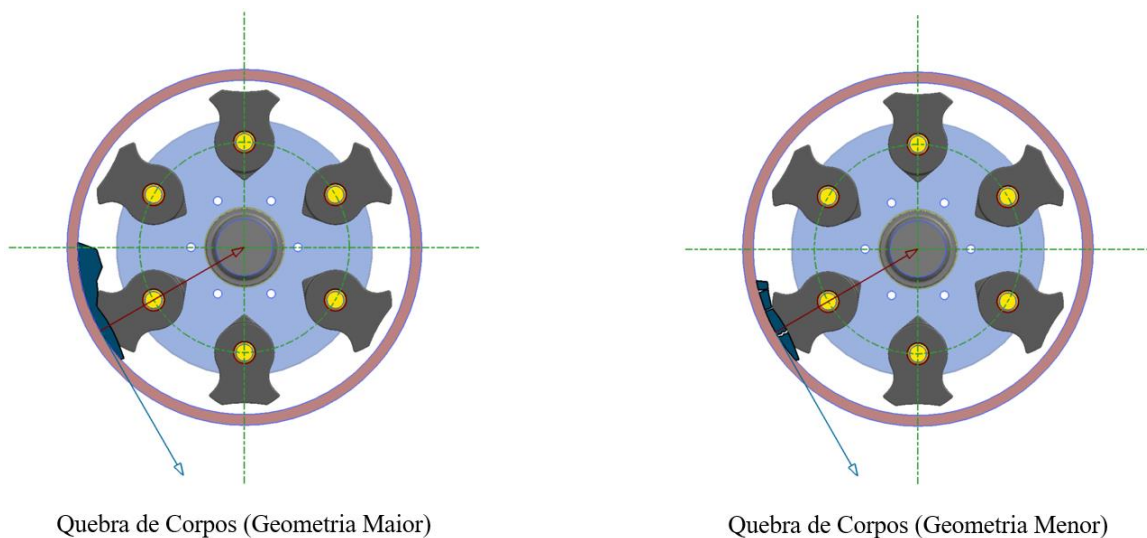
Figura 15: Indicação das Forças Atuantes no Sistema – Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

4.6 Input dos Dados Obtidos Anteriormente na Plataforma ANSYS Workbench

Figura 16: Diagrama Básico Mostrando a Quebra de Materiais – Shredder



Fonte: EAP Magotteaux Brasil (2023)

4.6.1 Input de Materiais na Biblioteca ANSYS Workbench

Para realizar uma análise de elementos finitos no ANSYS, é necessário especificar as propriedades dos materiais que serão usados no modelo. Os materiais podem ser especificados por meio do módulo "Engineering Data" do ANSYS. É importante escolher o material correto e inserir as propriedades corretas para garantir que a análise de elementos finitos seja precisa e realista. Devemos verificar as especificações do material e validar os resultados com testes físicos sempre que possível.

Figura 17: Input Material na Biblioteca ANSYS Workbench

The screenshot displays the ANSYS Workbench Engineering Data interface. The main window is titled "SIMULACAO_MARTELO - Workbench" and shows the "Engineering Data" tab. The "Outline of Schematic A2: Engineering Data" pane lists the following materials:

Row	Material Name	Source	Description
1	Contents of Engineering Data	Source	Description
2	Material		
3	ACO_MAGANES	General_Mat	A composição química típica do aço manganês é de aproximadamente 1% de carbono e 10% de manganês. Além disso, podem estar presentes outros elementos, como silício, fósforo, enxofre e outros elementos de liga, dependendo da aplicação do aço.
4	Structural Steel	General_Mat	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		

The "Properties of Outline Row 4: Structural Steel" pane shows the following properties:

Row	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7850	kg m ⁻³
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	Coefficient of Thermal Expansion	1,17E-05	K ⁻¹
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's...	
8	Young's Modulus	200	GPa
9	Poisson's Ratio	0,3	
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
12	Strain-Life Parameters		
13	Display Curve Type	Strain-Life	
14	Strength Coefficient	1,7	GPa
15	Strength Exponent	0,3	
16	Ductility Coefficient	0,8	
17	Ductility Exponent	0,25	
18	Cyclic Strength Coefficient	350	MPa
19	Cyclic Strain Hardening Exponent	0,25	
20	S-N Curve	Tabular	

Fonte: EAP Magotteaux Brasil, (2023)

Figura 18: Input Material na Biblioteca ANSYS Workbench

The screenshot displays the ANSYS Workbench interface for defining material properties. The left sidebar shows the project outline with 'ACO_MAGANES' selected under 'Materials'. The central 'Details of "ACO_MAGANES"' panel lists common material properties:

Common Material Properties	
Density	7,85e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	2e+05 MPa
Thermal Conductivity	0,060500 W/mm ² ·C
Specific Heat	4,34e+05 mJ/kg ² ·C
Tensile Yield Strength	250,00 MPa
Tensile Ultimate Strength	460,00 MPa
Nonlinear Behavior	False
Full Details	Click To View Full Details

The right panel, 'Engineering Data: Material View', shows the material's structural and thermal properties:

ACO_MAGANES	
A composição química típica do aço manganês é de aproximadamente 1% de carbono e 10% de manganês. Além disso, podem estar presentes outros elementos, como silício, fósforo, enxofre e outros elementos de liga, dependendo da aplicação do aço.	
Density	7,85e-06 kg/mm ³
Structural	
Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250,00 MPa
Strain-Life Parameters	
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	460,00 MPa
Tensile Yield Strength	250,00 MPa
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0,060500 W/mm ² ·C
Specific Heat Constant Pressure	4,34e+05 mJ/kg ² ·C

Fonte: EAP Magotteaux Brasil (2023)

4.6.2 Configuração – Malha Para a Análise Estrutural (FEM)

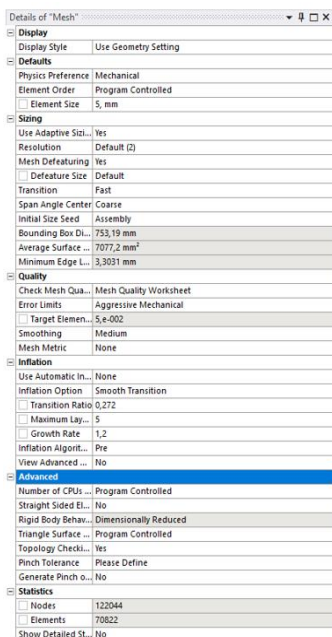
A configuração adequada da malha é essencial para realizar uma análise estática precisa e confiável no ANSYS. A malha é a representação discretizada da geometria do modelo e é usada para dividir o modelo em elementos finitos, permitindo que a equação de equilíbrio de seja resolvida em cada elemento. Configurar uma malha adequada é de extrema importância para análises estáticas no ANSYS, a seguir estão as principais razões que ressaltam essa importância:

- **Precisão dos resultados:** A malha influencia diretamente a precisão dos resultados da análise estática. Uma malha mal configurada pode levar a resultados imprecisos, como erros de convergência, oscilações nos resultados e expectativas imprecisas de tensão e deformações.

- **Eficiência computacional:** Uma malha bem estruturada pode reduzir o tempo de processamento da análise estática. Uma malha fina demais aumentará o tempo de processamento, enquanto uma malha grossa demais pode levar a resultados imprecisos. Uma malha bem configurada pode garantir uma boa relação entre a precisão dos resultados e o tempo de processamento.
- **Resolução de singularidades:** A malha adequada também é importante para garantir que as singularidades do modelo sejam tratadas sob custódia. Por exemplo, áreas com grande gradiente de tensão podem ser mal resolvidas por uma malha grosseira, geradas em tensões excessivas.
- **Captura de características do modelo:** Uma malha bem estruturada deve capturar as características do modelo que são importantes para uma análise estática. Por exemplo, se o modelo contiver recursos geométricos finos, como furos ou entalhes, a malha deve ser fina o suficiente para capturar esses detalhes.

Em resumo, a configuração adequada da malha é fundamental para realizar uma análise estática precisa e confiável no ANSYS. Isso pode levar a resultados mais precisos e eficientes, além de garantir uma resolução adequada de singularidades e a captura de características importantes do modelo.

Figura 19: Configuração da Malha Para Análise - ANSYS Workbench



Tipo de análise: Estática

Tipo de malha: Malha em Corpo Sólido



Configuração da Malha Para Cálculo:

- 1 - Mesher usado: Malha baseada em curvatura de transição
- 2 - Total de nós: 122044
- 3 - Elementos totais: 70822
- 4 - Proporção máxima: 8.8154



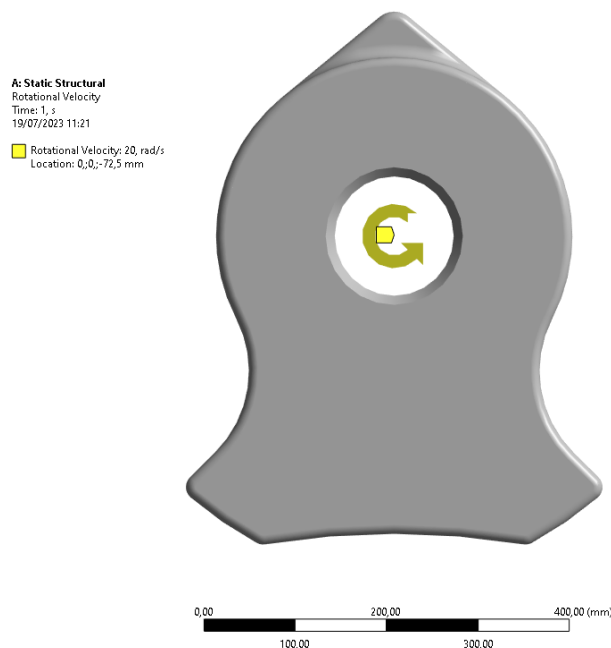
Fonte: Do Autor, (2023)

4.6.3 Input dos Dados Obtidos e Definição das Condições de Contorno

Os dados obtidos em campo podem ser usados como entrada em uma análise de elementos finitos no ANSYS para validar a simulação e fornecer informações sobre o comportamento real do sistema. Seguem os passos para inserir os dados obtidos no campo e definir as condições de contorno no ANSYS:

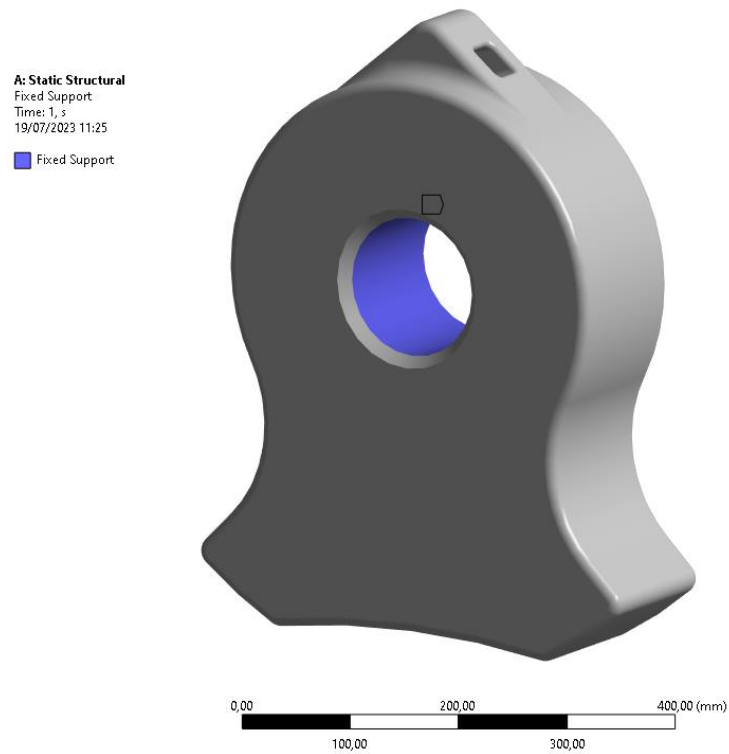
- **Coleta de dados em campo:** O primeiro passo é coletar os dados necessários do sistema em campo, que podem incluir informações de tensão, deformação, temperatura, entre outras.
- **Preparação dos dados:** Depois de coletar os dados, é importante processá-los e prepará-los para a entrada no ANSYS. Isso pode incluir a interpolação dos dados para correspondência com a geometria do modelo, a filtragem de dados ruidosos e a conversão de unidades, se necessário.
- **Inserção dos dados no ANSYS:** Com os dados preparados, é possível inseri-los no ANSYS. Isso pode ser feito por meio da criação de uma tabela de dados ou pela importação de um arquivo contendo os dados.
- **Definição das condições de contorno:** Com os dados inseridos, é possível definir as condições de contorno para a análise de elementos finitos. As condições de contorno definem como o modelo será carregado e como as restrições serão aplicadas.

Figura 20: Input 1 - Forças Atuantes no Sistema (Velocidade de Giro)



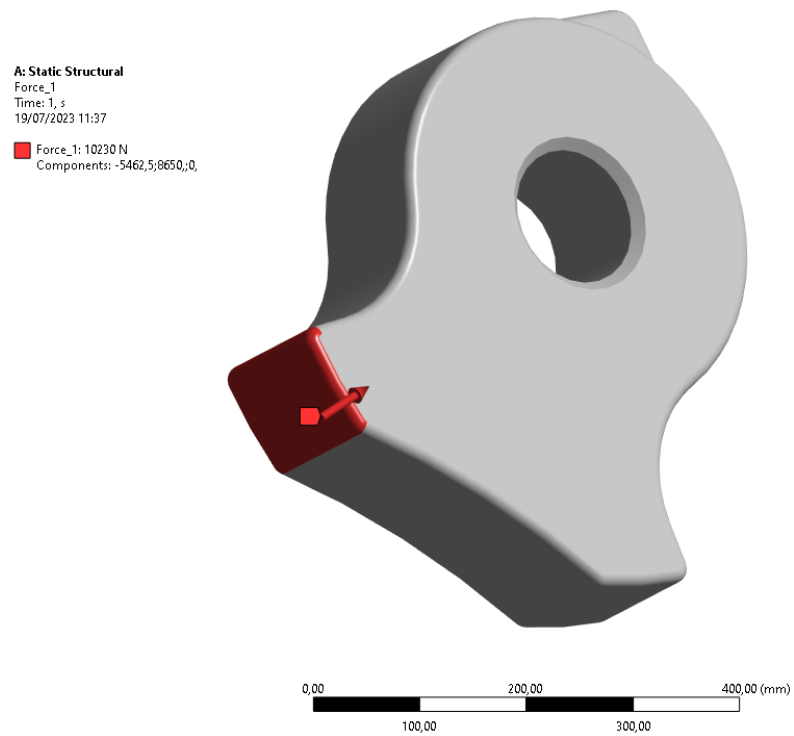
Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 21: Input 2 - Forças Atuantes no Sistema (Pivotamento do Martelo ao Eixo)



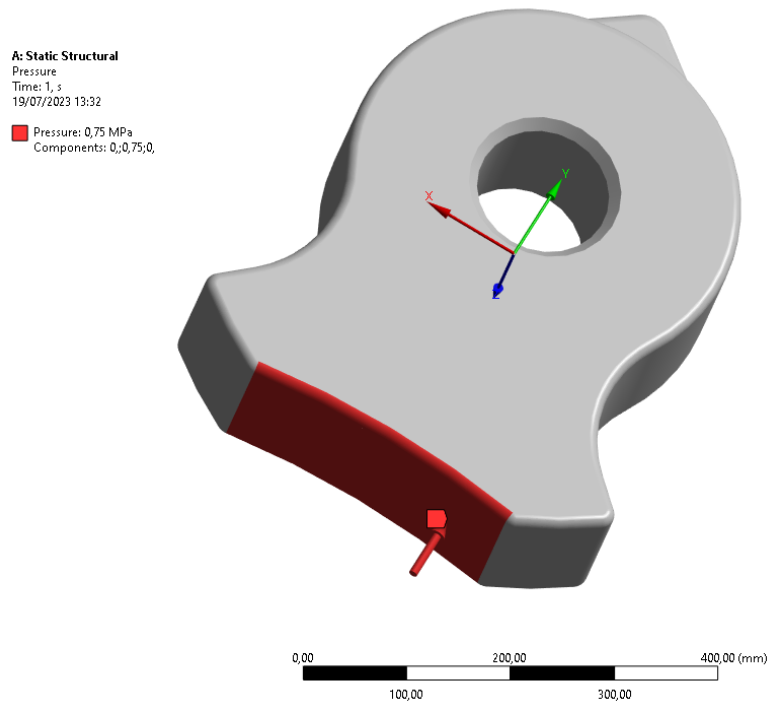
Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 22: Input 3 - Forças Atuantes no Sistema (Contato 1 – Quebra de Material)



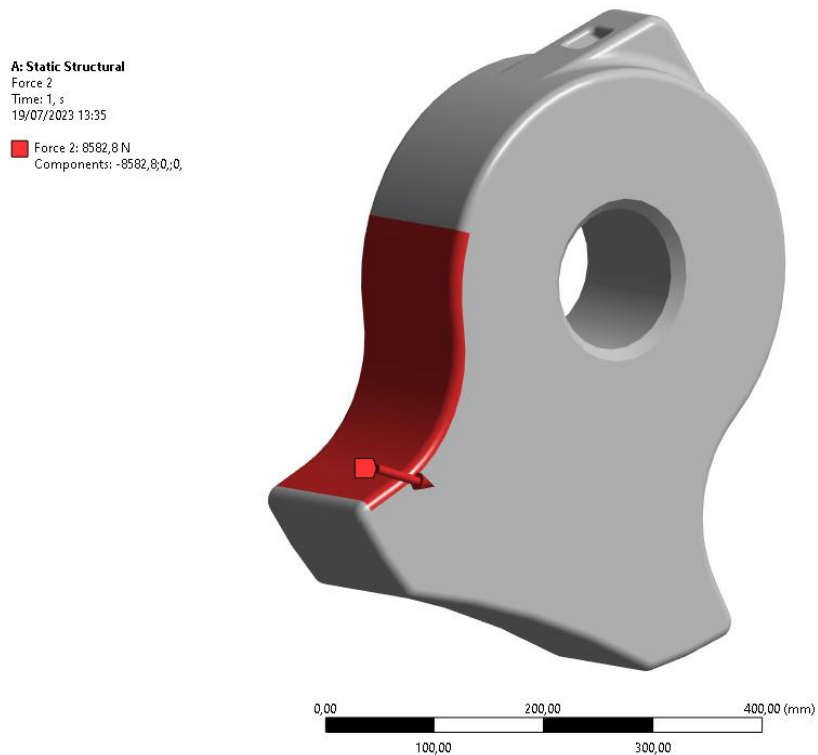
Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 23: Input 4 - Forças Atuantes no Sistema (Contato 2 – Quebra de Material)



Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 24: Input 5 - Forças Atuantes no Sistema (Contato 3 – Quebra de Material)

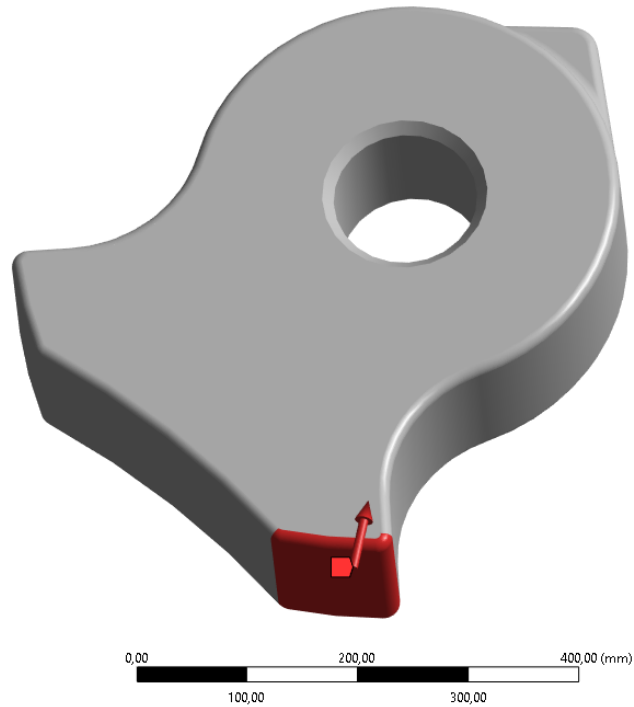


Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 25: Input 6 - Forças Atuantes no Sistema (Contato 4 – Quebra de Material)

A: Static Structural
Force 3
Time: 1, s
19/07/2023 13:38

Force 3: 2915,5 N
Components: 1500,;2500,;0,

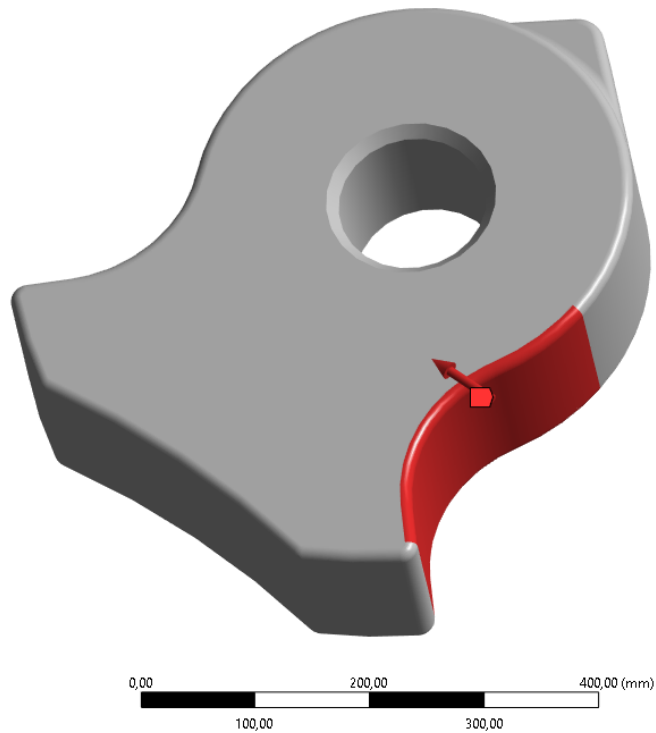


Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 26: Input 7 - Forças Atuantes no Sistema (Contato 5 – Quebra de Material)

A: Static Structural
Force 4
Time: 1, s
19/07/2023 13:42

Force 4: 502,49 N
Components: 502,49;0,;0,



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Execução da análise:** Após definir as condições de contorno, uma análise pode ser executada. Durante a análise, os resultados obtidos podem ser comparados com os dados obtidos em campo para validar a simulação.
- **Análise os resultados:** Os resultados podem incluir tensões, deformações, deslocamentos, entre outros. É importante analisar cuidadosamente os resultados para verificar se o modelo está se comportando de acordo com as expectativas.
- **Ajuste do Modelo:** Fazer os ajustes no modelo e nas condições de contorno, se faz necessário quando os resultados não estiverem de acordo com as expectativas.

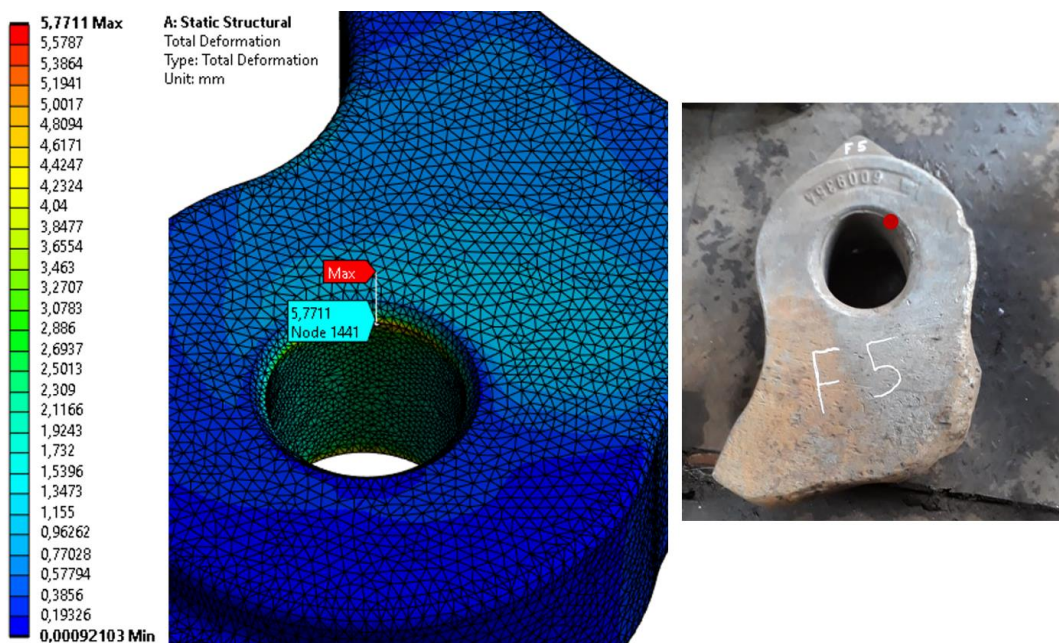
4.6.4 Resultados da Análise por Elementos Finitos

- **Magnitude Equivalente de Deformação Elástica**

A magnitude equivalente de deformação elástica para o aço manganês pode variar dependendo das propriedades específicas do material e das condições de aplicação de carga. No entanto, para dar uma referência geral, o equivalente de deformação elástica típica para o aço manganês aplicado no componente aqui estudado é de cerca de 0,2 a 0,3%.

Vale ressaltar que a equivalente de deformação elástica depende da precisão das propriedades elásticas do material e das condições de teste utilizadas para medir a tensão e a deformação.

Figura 27: Interpretação dos Resultados ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

A deformação máxima neste ponto se mostra acima do permitido, o que corrobora com as evidências encontradas em campo, pois conforme a especificação o valor máximo permitido de deformação nessa região do martelo é de 0.3%. Tendo em vista que o diâmetro do furo a nível de projeto é de \varnothing 130.2 mm (ver figura 06), a deformação apresentada faz com o que este valor passe para \varnothing 136.977 mm o que contribui para perda da fixação adequada ao eixo de pivotamento na câmara de trituração.

Vale ressaltar que este valor ultrapassa o limite permitido que é de 0.3% conforme indicado acima, fazendo com o que o martelo venha a falhar em campo e progredindo posteriormente para um defeito catastrófico.

Com base nos resultados da simulação, foi identificado um nível de deformação de 5.205%, um valor significativamente acima do permitido, corroborando com os dados obtidos em campo, conforme mostra a foto ao lado. A formação de carbonetos em aços manganês austeníticos parece estar associada ao processo de produção, o que pode contribuir para essa elevada deformação. Esses achados ressaltam a necessidade de revisar e aprimorar o processo de fabricação do martelo para evitar falhas e garantir maior durabilidade e desempenho em campo.

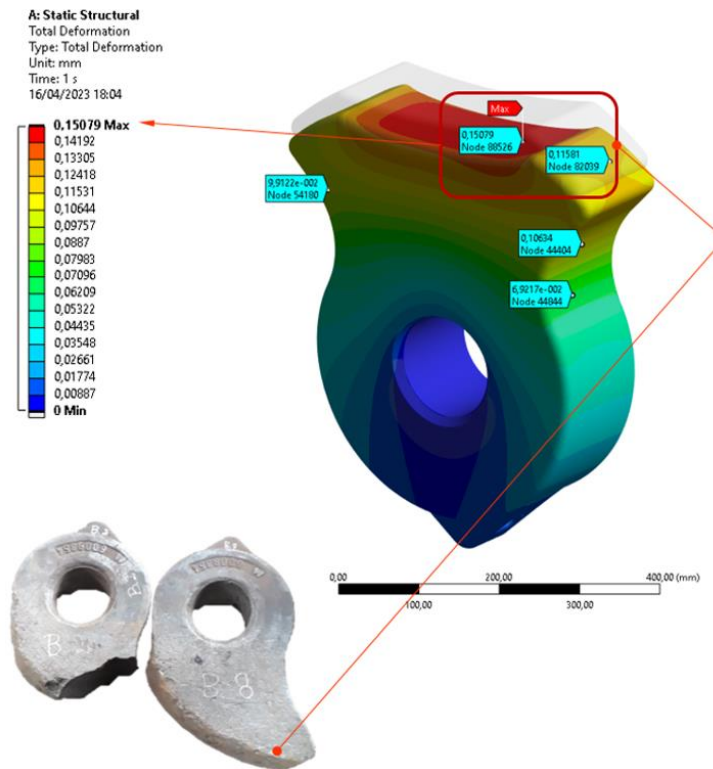
- **Deformação Total**

A deformação total em um modelo do ANSYS é uma medida da mudança na geometria do modelo, incluindo tanto a deformação elástica quanto a deformação plástica. A deformação total pode ser controlada a partir dos resultados da análise de elementos finitos no ANSYS.

A magnitude da deformação total no aço manganês pode variar dependendo das propriedades do material e das condições de aplicação de carga. No entanto, para dar uma referência geral, a deformação total típica no aço manganês é de cerca de 0.0010mm a 0.0015mm, dependendo das condições de aplicação de carga. Essa magnitude pode variar significativamente de acordo com as propriedades específicas do material, o tipo de carga e a geometria do modelo.

A magnitude da deformação total no aço manganês pode variar dependendo das propriedades do material e das condições de aplicação de carga. No entanto, para dar uma referência geral, a deformação total típica no aço manganês é de cerca de 0.0010mm a 0.0015mm, dependendo das condições de aplicação de carga. No resultado apresentado acima temos uma deformação acima do permitido (0.15079 mm) contribuindo para o desgaste prematuro em uma das principais faces de corte do martelo.

Figura 28: Interpretação dos Resultados ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Tensão Equivalente (Von-Misses)**

A tensão equivalente (Von-Misses) ou stress em um modelo ANSYS é uma medida da intensidade da tensão em um ponto específico do modelo. Ele leva em consideração as tensões principais e secundárias presentes no ponto, permitindo uma avaliação mais precisa da resistência do material a falhas. O equivalente de tensão pode ser calculado a partir dos resultados da análise de elementos finitos no ANSYS. O ANSYS pode calcular o equivalente de tensão em cada ponto de um modelo de elementos finitos. Para fazer isso, siga as etapas abaixo:

$$\sigma_v = \left[\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} - \sigma_{xx}\sigma_{zz} - \sigma_{yy}\sigma_{zz} + 3\tau_{xy}^2 + 3\tau_{xz}^2 + 3\tau_{yz}^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

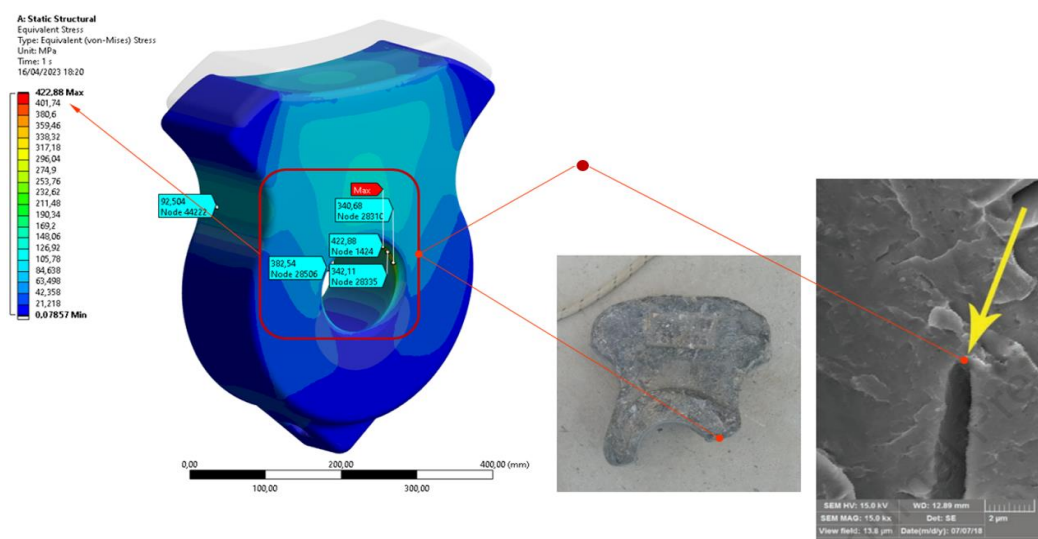
- **Execute uma análise de elementos finitos no ANSYS.** Certifique-se de que as condições de contorno e as propriedades do material estejam corretamente definidas para obter resultados precisos.
- **Abra a janela de resultados do ANSYS.** Isso pode ser feito selecionando "Solution" na barra de ferramentas do ANSYS e clicando em "Solution Information".

- **Selecione "Equivalent Stress" na lista de resultados disponíveis.** Isso mostrará o equivalente de tensão em cada ponto do modelo.
- **Analise os resultados do equivalente de tensão.** Verifique se o equivalente de tensão está dentro dos limites aceitáveis para o material e conforme as condições de carga. Se o equivalente de tensão estiver acima do limite, pode ser necessário revisar o modelo e as condições de carga.

A tensão de escoamento é um parâmetro crucial que indica a resistência de um material à deformação plástica. No caso do aço manganês utilizado nesta aplicação em estudo, a tensão de escoamento pode variar consideravelmente, geralmente situando-se entre 200 e 350 MPa, dependendo da composição do material e do processo de fabricação. Entretanto, é fundamental destacar que a tensão de escoamento específica para o aço manganês pode variar significativamente de acordo com as condições específicas de carga aplicada, bem como outros fatores relacionados à composição e fabricação do material. Portanto, é essencial realizar análises e testes adicionais para determinar a tensão de escoamento precisa do aço manganês utilizado nessa aplicação, garantindo assim um projeto confiável e seguro para as demandas específicas da operação.

Nota-se que a tensão de escoamento verificada no cálculo feito no ANSYS ultrapassa o limite especificado pelo fabricante do equipamento sendo encontrada uma tensão máxima de 422.88 MPa, isso fica evidente na foto feita em levantamento de campo e na imagem obtida da metalografia. O que pode iniciar a trinca e sua propagação ao longo do ciclo de trabalho.

Figura 29: Interpretação dos Resultados ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

A tensão de escoamento é a tensão em que um material começa a se deformar plasticamente, sem retornar à forma original. É uma propriedade essencial para projetar componentes resistentes a falhas e deformações permanentes. Em materiais dúcteis, como metais e ligas, é obtida a partir de ensaios de tração, sendo amplamente utilizada em engenharia e ciência dos materiais.

5 - Otimização Topológica (ANSYS Workbench) Considerando o Aço Nano Bainítico

5.1 Otimização Topológica (Revisão)

Ao longo dos anos, a teoria da OT de estruturas tem evoluído significativamente, impulsionada por importantes contribuições de vários pesquisadores. Em 1854, Maxwell estabeleceu as bases dessa disciplina ao realizar uma análise topológica fundamental de treliças, considerando o peso mínimo sob restrições de tensão. Essa pesquisa pioneira foi um marco fundamental para o estudo da OT. Em 1904, Michell deu um passo adiante ao apresentar a teoria da treliça Michell, que efetivamente deu início à OT como a conhecemos hoje. Desde então, diversos avanços foram feitos nessa área. Bendsoe e Kikuchi(1988) propuseram o método de homogeneização, uma abordagem inovadora que possibilita a otimização topológica de estruturas contínuas, dividindo a área de projeto em diferentes unidades microestruturais. Essa técnica abriu novas possibilidades para a OT em um contexto mais amplo.

Para entender profundamente o princípio básico da OT, programas relacionados foram publicados com propósitos educacionais. Esses programas não apenas ajudaram os iniciantes a estudar OT, mas também facilitaram o desenvolvimento da OT. Para maior conveniência de leitura, podemos citar implementações de programas dos métodos existentes de OT. Para o método de Material Isotrópico Sólido com Penalização (SIMP), Sigmund (2001); Zuo e Saitou (2017), como uma das abordagens de OT baseadas em densidade, foi amplamente utilizado, especialmente desde a publicação do código de 99 linhas em 2001 (Sigmund 2001). Em seguida, outras versões aprimoradas e desenvolvidas do método SIMP foram publicadas para estruturas bidimensionais 2D, Andreassen et al. (2010); Talischi et al. (2012); Tavakoli e Mohseni 2014; Kim et al. 2020; Zhu et al. 2021). O código de 169 linhas por Liu e Tovar (2014) e o código em 3D, Lagaros et al. (2018) focaram apenas na OT estrutural tridimensional (3D). Para compactar e melhorar a eficiência da OT, um novo código de 99 linhas e sua versão de extensão com 125 linhas foram desenvolvidos para estruturas 2D e 3D, respectivamente Ferrari e Sigmund (2020). Ao combinar os métodos SIMP e de homogeneização, materiais com propriedades extremas foram projetados pelo código de 119

linhas, Xia e Breitkopf (2015), e a OT concorrente para estruturas compostas em múltiplas escalas foi ilustrada em Gao et al. (2019). Recentemente, Simonetti et al. (2021,2023) expandiram a técnica SESO para OT de estruturas elásticas tridimensionais acoplando a confiabilidade estrutura com análise de falha da estrutura.

5.2 Teoria da Otimização da Topologia no ANSYS Workbench

O módulo de otimização topológica do ANSYS transforma o problema de OT em um problema de otimização de forma sob uma forma especial. O objetivo é buscar a máxima rigidez e o mínimo volume da estrutura sob certas restrições, utilizando a distribuição de material como parâmetros de otimização. A otimização topológica do ANSYS pode ser usada para encontrar a máxima rigidez, o mínimo volume e a frequência natural máxima da estrutura. A função objetivo da otimização topológica reduz a energia de deformação estrutural, desde que as restrições estruturais sejam atendidas. Reduzir a energia de deformação estrutural significa aumentar a rigidez da estrutura.

Essa tecnologia pode ser alcançada atribuindo densidade a cada unidade de elemento finito por meio de variáveis de projeto (η_i). O valor da pseudo-densidade varia de 0 a 1, onde $\eta_i \approx 0$ representa a remoção de material e $\eta_i \approx 1$ representa a preservação do material. O volume total é a soma dos volumes de todas as unidades, ver equação 2.

$$V = \sum_{i=1}^N \eta_i V_i \quad (3)$$

A pseudo-densidade (η_i) afeta o volume e o tensor de elasticidade de cada unidade, ou seja conforme equação 3.

$$[E_i] = [E(\eta_i)] \quad (4)$$

Na equação elástica linear convencional, o tensor de elasticidade é igual ao vetor de tensão e ao vetor de deformação, representado pela equação 4.

$$[\sigma_i] = [E(\eta_i)] * [\varepsilon_i] \quad (5)$$

O vetor $[\sigma_i]$ é o vetor de tensão da unidade i , enquanto o vetor $[\varepsilon_i]$ é o seu vetor de deformação.

5.3 Formulação do Problema de Otimização Topológica - ANSYS Workbench

O problema de OT pode ser definido como um problema binário cujo objetivo é fornecer a melhor distribuição de material no domínio da solução, de acordo com um critério especificado. O problema de OT-ANSYS analisado neste trabalho, é a formulação clássica para Compliance (que é o inverso da rigidez), que minimiza o trabalho realizado por forças externas sujeitas a um volume prescrito, V^* . A formulação matemática deste problema pode ser expressa como na equação 5:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimize } C(\eta_i) &= F^T u(\eta_i) = \sum_i^n u_i^T K_i(\eta_i) u_i \\
 \text{Sujeito a : } V &= \sum_1^{i=n} \eta_i^p V_i \leq V^* \\
 K_i(\eta_i) u_i &= F \\
 0 &\leq \eta_i \leq 1
 \end{aligned} \tag{6}$$

Onde a conformidade $C(x)$ é a função objetivo; F e u são os vetores de força global e deslocamento generalizado, respectivamente; K é a matriz de rigidez global; $V(x)$ é o volume total da estrutura.

A resolução desse problema de otimização pode ser feita usando algoritmos de otimização, como algoritmos genéticos, otimização baseada em gradiente, otimização evolucionária discreta. Esses algoritmos podem ser implementados em softwares de simulação, como o ANSYS Workbench, para realizar a OT e obter uma configuração ótima para projeto. É importante ressaltar que a formulação matemática pode variar dependendo do problema. Recomenda-se consultar literatura especializada em otimização topológica e análise estrutural para obter formulações mais avançadas e específicas para problemas particulares.

5.4 Acoplamento da Análise Estática à Otimização Topológica - ANSYS Workbench

Para encontrar a compliance mínima e, conseqüentemente, a máxima rigidez estrutural, é necessário resolver essa equação 5, minimizando o valor da compliance $C(\eta_i)$. A compliance é uma medida da energia de deformação armazenada na estrutura sob uma

determinado carregamento. Manipulando a geometria da estrutura, propriedades do material e condições de contorno, é possível otimizar o projeto para obter a máxima rigidez estrutural estática, ao mesmo tempo em que se satisfaz as restrições de volume. A abordagem e as técnicas específicas utilizadas para resolver esse problema podem variar dependendo da natureza do sistema estrutural e das ferramentas computacionais ou algoritmos de otimização disponíveis.

O acoplamento da Análise Estática (AE) com a Análise Topológica (AT) no ANSYS Workbench refere-se ao processo integrado de conduzir uma análise de elementos finitos sob condições de carga estática e, em seguida, aplicar a OT para aperfeiçoar o projeto de um componente ou sistema. Na Análise Estática a estrutura é analisada sob condições de carga estática para determinar parâmetros como tensões, deslocamentos e deformações. Isso permite compreender como o sistema reagirá a uma determinada carga e identificar áreas de tensão máxima ou mínima.

A AT proposta, por outro lado, é um método que visa melhorar a eficiência de um projeto, removendo material ineficiente, mantendo ao mesmo tempo a funcionalidade e a integridade estrutural do componente. Esse processo é geralmente guiado por um algoritmo que busca minimizar o peso da estrutura, ao mesmo tempo em que mantém ou melhora o desempenho sob as condições de carga especificadas. Nos martelos de Shredder a redução de peso é necessária para obter uma melhor distribuição de material no processo de fundição, competitividade de mercado. A análise no eixo onde o martelo será montado é importante para evitar tensões residuais, ciclos de fadiga severos e economia de material.

O acoplamento desses dois tipos de análise permite aos engenheiros projetar componentes e estruturas que são leves e capazes de resistir às forças esperadas em sua operação. Isso é especialmente importante em áreas como engenharia aeroespacial, automotiva, metalúrgica e mineração, onde o peso é um fator crítico, mas a segurança e a resistência estrutural não podem ser comprometidas.

5.5 Procedimento de Otimização Topológica – Metodologia no ANSYS Workbench

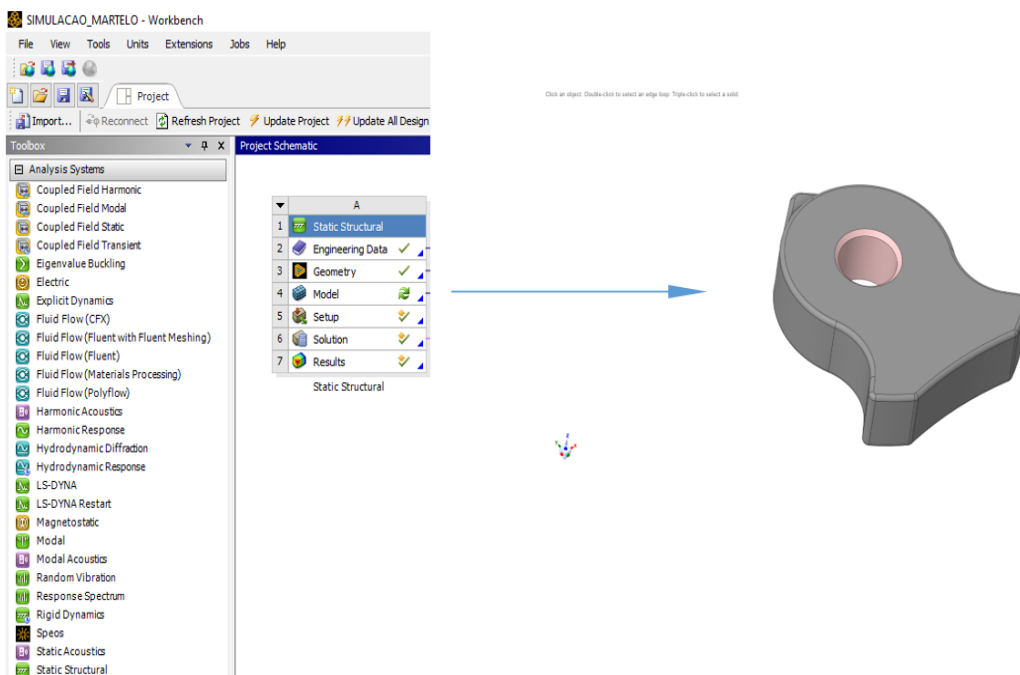
A OT no ANSYS Workbench é um método iterativo usado para aprimorar o projeto de engenharia. Esse processo baseia-se nas informações de tensões e deformações obtidas por meio da análise estrutural. No caso específico do martelo de Shredder, o objetivo é reduzir o

peso total em cerca de 8% em relação ao peso inicial. Essa meta foi estabelecida com base em dados fornecidos pelo usuário do equipamento e em análises de campo. A OT permite uma melhor distribuição de material, resultando em uma estrutura mais eficiente e leve, o que pode trazer benefícios como maior economia de matéria-prima, melhoria no desempenho e redução de custos de produção. Ao considerar as restrições e requisitos específicos do projeto, é possível obter uma configuração ótima que atenda aos critérios de resistência, durabilidade e funcionalidade necessários para o componente.

A otimização topológica no ANSYS Workbench envolve as seguintes etapas principais:

- 1) Importação do Modelo CAD:** Importe ou crie o modelo geométrico no ANSYS Workbench. Isso pode ser feito usando ferramentas de modelagem CAD ou importando um arquivo CAD existente.

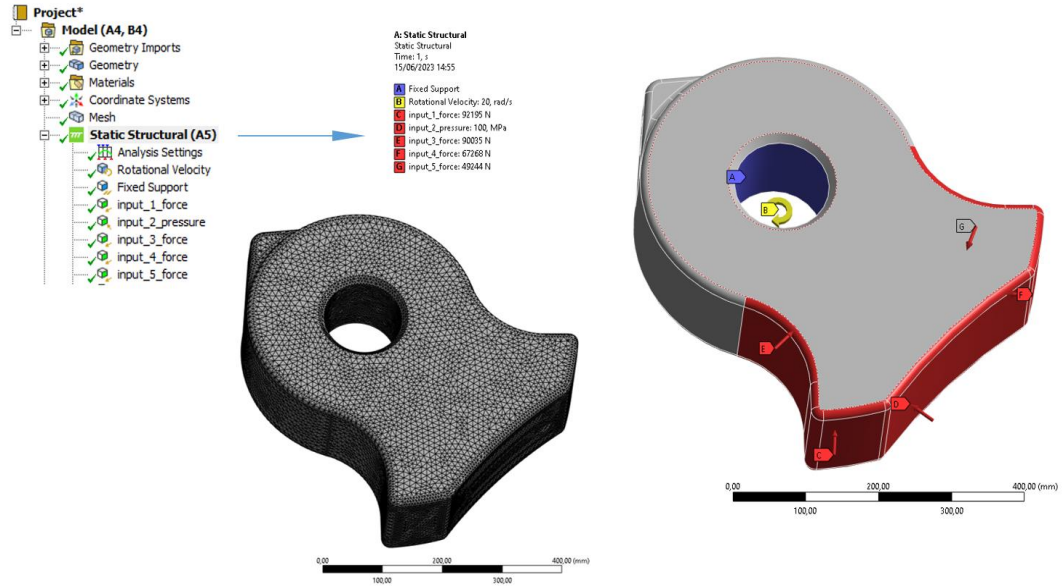
Figura 30: Importação do Modelo CAD - ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- 2) Definições das restrições e condições de contorno:** Especifique as restrições e condições de carregamento aplicadas ao modelo. Isso pode incluir restrições de deslocamento, frequências naturais, apoios, pressão, temperatura entre outros.

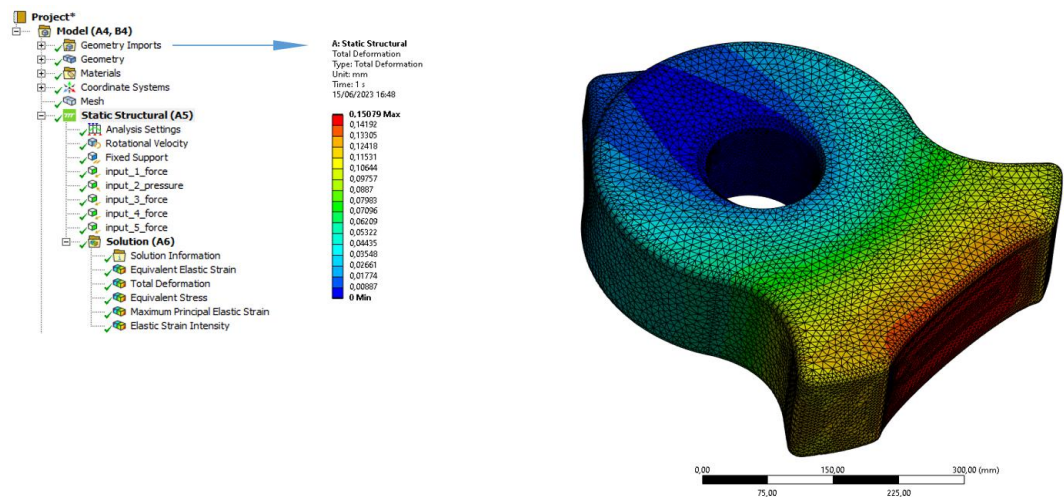
Figura 31: Definição das Condições de Contorno - ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- 3) **Resultado da Análise Estática:** Analise os resultados da AE, este resultado deve é muito importante pois será acoplado à OT. Então, as tensões e deformações resultantes desta análise serão acopladas ao procedimentode OT.

Figura 32: Resultado da Análise Estática - ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- 4) **Topologia Ótima:** A topologia ótima é analisada dentro dos parâmetros definidos na análise estática, isto é, as restrições de projeto como tensão máxima estabelecida na AE não pode ser excedida sob a penalidade da estrutura falhar.

Figura 33: Configuração da Otimização Topológica - ANSYS Workbench

The screenshot displays the ANSYS Workbench interface for Topological Optimization. The Project Schematic shows a sequence of analyses: Static Structural (A), Structural Optimization (B), and Topology Optimization (F). The Analysis Systems list on the left includes various simulation types, with Static Structural and Structural Optimization selected. The 'Parameter Set' window is visible, and the 'Details of Analysis Settings' panel shows the number of steps set to 3. The 'Objective' table is also shown.

Objective

Enabled	Response Type	Goal	Formulation	Environment Name	Weight	Multiple Sets	Start Step	End Step	Step	Start Mode	End Mode	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	Program Controlled	load case 1, 2 und 3	1	Disabled	N/A	N/A	1	N/A	N/A	N/A
<input checked="" type="checkbox"/>	Compliance	Minimize	Program Controlled	load case 1, 2 und 3	2	Enabled	2	3	Multiple	N/A	N/A	N/A

Tabular Data

Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	1	0.	0.	0.
2	1	1.	0.	1000.
3	2.	150.	= 0.	0.
4	3.	-150.	= 0.	0.

Condition Diagrams:

- Tamanho mínimo de elemento:**
 - Condition not fulfilled: Diagram showing a sphere with some active elements (yellow) and some inactive (blue).
 - Condition fulfilled: Diagram showing a sphere with all active elements (yellow).
- Tamanho máximo de elemento:**
 - Condition not fulfilled: Diagram showing a sphere with some active elements (yellow) and some inactive (blue).
 - Condition fulfilled: Diagram showing a sphere with all active elements (yellow).

Fonte: Do Autor, (2023)

- 5) **Procedimento de Otimização Topológica:** O ANSYS Workbench, então, executará a otimização topológica, removendo o material de áreas onde ele é menos necessário (com base nas tensões e deformações calculadas na análise estática).

Figura 34: Execução da Otimização Topológica - ANSYS Workbench

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface during the execution of Topological Optimization. The Project Schematic on the left shows the configuration of the analyses: Model (A4, B4), Static Structural (A5), and Structural Optimization (B5). The 3D model of a mechanical part is shown with a red mesh and a blue optimization region. The Analysis Systems list on the left includes the following items:

- Model (A4, B4)**
 - Geometry Imports
 - Geometry
 - Materials
 - Coordinate Systems
 - Mesh
- Static Structural (A5)**
 - Analysis Settings
 - Rotational Velocity
 - Fixed Support
 - input_1_force
 - input_2_pressure
 - input_3_force
 - input_4_force
 - input_5_force
- Solution (A6)**
 - Solution Information
 - Equivalent Elastic Strain
 - Total Deformation
 - Equivalent Stress
 - Maximum Principal Elastic Strain
 - Elastic Strain Intensity
- Structural Optimization (B5)**
 - Analysis Settings
 - Optimization Region
 - Objective
 - Response Constraint
- Solution (B6)**
 - Solution Information
 - Topology Density

The 3D model shows a mechanical part with a red mesh and a blue optimization region. The Analysis Systems list on the left includes the following items:

- Structural Optimization (B5)**
 - Design Region: Topology
 - Exclusion Region
 - Objective: Minimize Compliance
 - Response Constraint: 92 % Mass

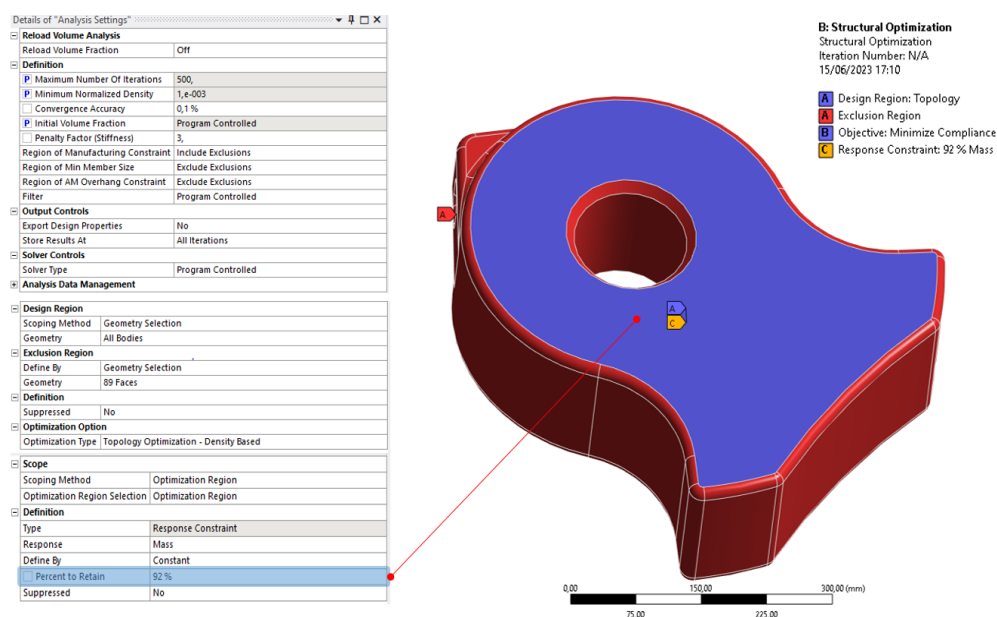
Fonte: Do Autor, (2023)

Os parâmetros de configuração para a otimização topológica no ANSYS Workbench definem as condições e os limites dentro dos quais a otimização ocorrerá. Esses parâmetros

são fundamentais para o processo, pois orientam a simulação para alcançar o resultado desejado. Alguns dos parâmetros são:

- **Fração de Volume:** Este parâmetro define a quantidade de material que o programa deve tentar remover da estrutura. Por exemplo, uma fração de volume de 0,4 significa que o programa deve tentar remover material suficiente para que a estrutura final seja 40% do volume original.
- **Casos de Carga:** Os casos de carga são as diferentes combinações de forças e restrições que a estrutura pode encontrar durante seu uso. Cada caso de carga é tratado como um cenário separado durante a otimização topológica.
- **Restrições de Tensão ou Deformação:** Estas são as limitações colocadas na tensão máxima ou deformação que a estrutura pode sofrer. Elas garantem que a estrutura otimizada ainda seja capaz de suportar as cargas previstas sem falhar.
- **Restrições de Fabricação:** Estas restrições limitam a forma da estrutura otimizada para garantir que ela ainda possa ser fabricada. Por exemplo, você pode especificar que o programa evite criar orifícios ou recessos que seriam muito pequenos para serem usinados.

Figura 35: Parâmetros de Configuração da Otimização Topológica - ANSYS Workbench

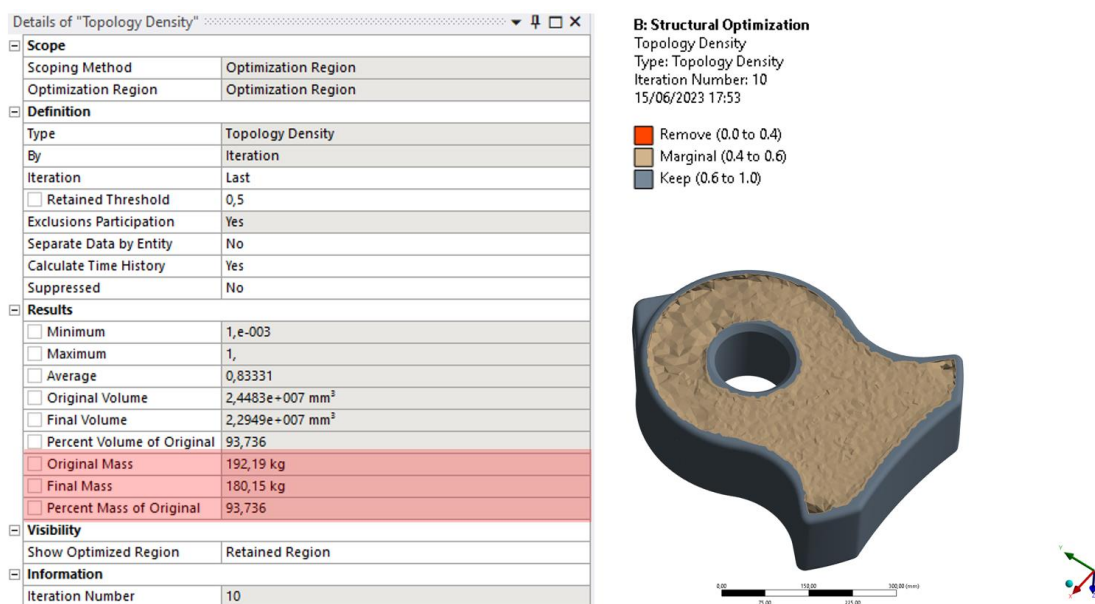


Fonte: Do Autor, (2023)

- 6) Análise do Resultado:** Após a otimização topológica, teremos um novo modelo que foi ajustado para ser tão eficiente quanto possível, de acordo com os critérios que foi definido. Para o caso aqui tratado necessitamos de uma redução de peso em torno de 8% do peso inicial.

A OT é uma ferramenta poderosa que pode ser valiosa no processo de projeto de engenharia. No entanto, é crucial reconhecer que ela não pode substituir a experiência do engenheiro. Portanto, é fundamental aplicar uma abordagem cuidadosa ao utilizar essa técnica. É imprescindível revisar e validar os resultados da otimização topológica, especialmente no contexto específico em questão. Recomenda-se evitar uma abordagem excessivamente agressiva e, em vez disso, buscar aliviar o peso da estrutura na medida do possível, sem comprometer sua integridade e resistência. Afinal, o objetivo não é apenas reduzir peso, mas também garantir a durabilidade e a segurança da estrutura, evitando qualquer possibilidade de colapso prematuro.

Figura 36: Análise do Resultado da Otimização Topológica - ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

Após a conclusão de uma otimização topológica, é necessário interpretar os resultados para entender o que eles significam e como podem ser aplicados ao design. A otimização topológica pode gerar uma variedade de informações úteis. Eis alguns aspectos a serem considerados na interpretação dos resultados:

- 7) **Geometria Otimizada:** O resultado mais óbvio é a nova forma otimizada do objeto. Isso mostra onde o material foi removido durante o processo de otimização. Essas regiões de remoção de material são geralmente aquelas que contribuem menos para a resistência estrutural da peça em relação às cargas aplicadas.
- 8) **Distribuição de Tensões:** Ao comparar a distribuição de tensões no modelo otimizado com a do modelo original, você pode ver como a otimização afetou o comportamento da peça sob carga. A tensão deve ser bem distribuída na estrutura otimizada, sem pontos de alta concentração de tensão que possam levar a uma falha.
- 9) **Distribuição de Deformações:** Similarmente, as deformações na estrutura otimizada devem ser verificadas. Áreas de alta deformação podem indicar pontos fracos potenciais na estrutura.
- 10) **Volume da Estrutura:** A redução no volume total da peça ou estrutura indica uma diminuição na quantidade de material necessário para a fabricação, o que pode levar a uma economia de custos.
- 11) **Complacência (ou Flexibilidade):** A complacência é a tendência de uma estrutura de se deformar sob a ação de forças externas. A OT geralmente busca minimizar a complacência (ou seja, tornar a estrutura mais rígida) para uma dada quantidade de material.

É importante lembrar que os resultados da OT devem ser tratados como um ponto de partida para o design, não como a solução final. Eles mostram uma direção possível para a otimização, mas o design final pode exigir mais considerações, como a viabilidade de fabricação, a durabilidade a longo prazo e outras restrições específicas do projeto. Portanto, os resultados devem ser validados com uma nova análise estática ou, preferencialmente, com testes físicos.

5.6 Refinamento Geométrico – Projeto CAD

Refinamento geométrico" é um termo usado no contexto de modelagem e design assistido por computador (CAD - Computer Aided Design), especialmente na análise de

elementos finitos (FEA - Finite Element Analysis). O refinamento geométrico envolve a melhoria da precisão de um modelo digital aumentando a densidade e a complexidade da malha ou grau usado para representá-lo.

A análise topológica em CAD é o estudo de como as diferentes partes de um objeto estão conectadas. Isso pode envolver a análise de bordas, vértices e faces de um objeto, bem como a forma como essas partes interagem entre si. Depois de realizar uma análise topológica, o refinamento geométrico pode ser necessário para melhorar a precisão do modelo. Isso pode ser feito de várias maneiras, como:

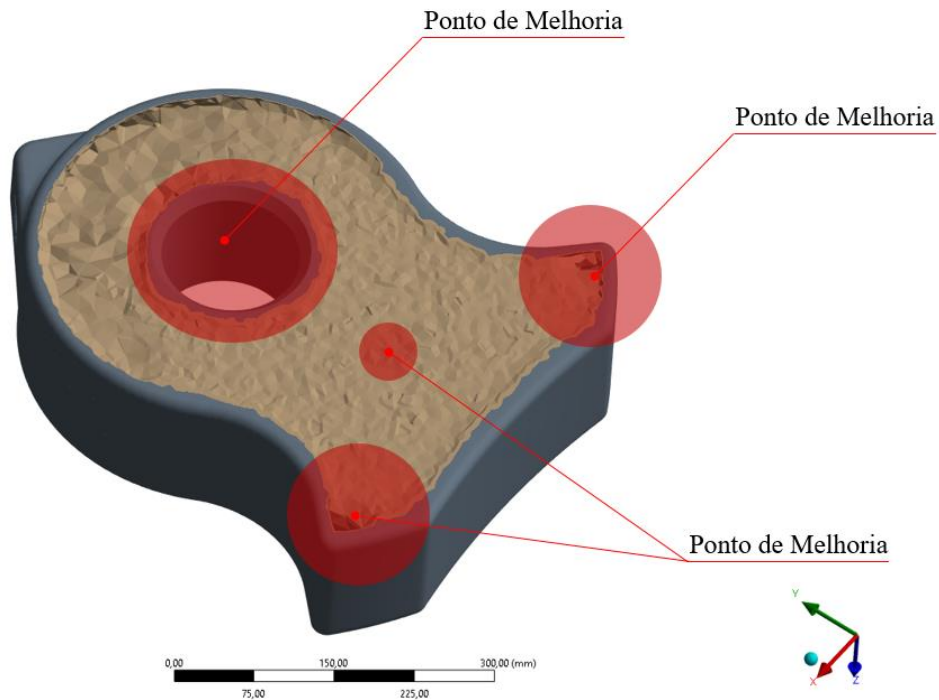
- **Refinamento de malha:** Isso envolve aumentar a quantidade de células ou elementos na malha que compõe o modelo. Isso pode melhorar a precisão do modelo, mas também aumentará a quantidade de computação necessária para analisá-lo.
- **Adaptação de malha:** Este é um tipo mais avançado de refinamento de malha onde o tamanho e a forma dos elementos na malha são alterados para melhor se adequar ao objeto sendo modelado. Isso pode ser especialmente útil para modelar formas complexas ou irregulares.
- **Refinamento de forma:** Isso envolve a alteração da geometria do modelo para melhor representar o objeto real. Isso pode ser feito alterando a forma dos elementos na malha ou alterando a forma do próprio modelo.

Estas são apenas algumas das técnicas que podem ser usadas para o refinamento geométrico após a análise topológica em CAD. A escolha da técnica apropriada irá depender das necessidades específicas do projeto e da complexidade do objeto a ser modelado.

Refinamento geométrico no CAD (Computer-Aided Design) após análise topológica é um processo de otimização de um modelo geométrico. Depois de realizar uma análise topológica, que envolve a verificação da provisão e conexão das entidades, o refinamento geométrico é feito para aprimorar a qualidade e precisão dos modelos.

- **Identificação de Problemas:** Após a análise topológica, é preciso identificar problemas que podem ser aprimorados, como faces mal identificadas, arestas que não se conectam trilhadas, lacunas na malha, entre outros.

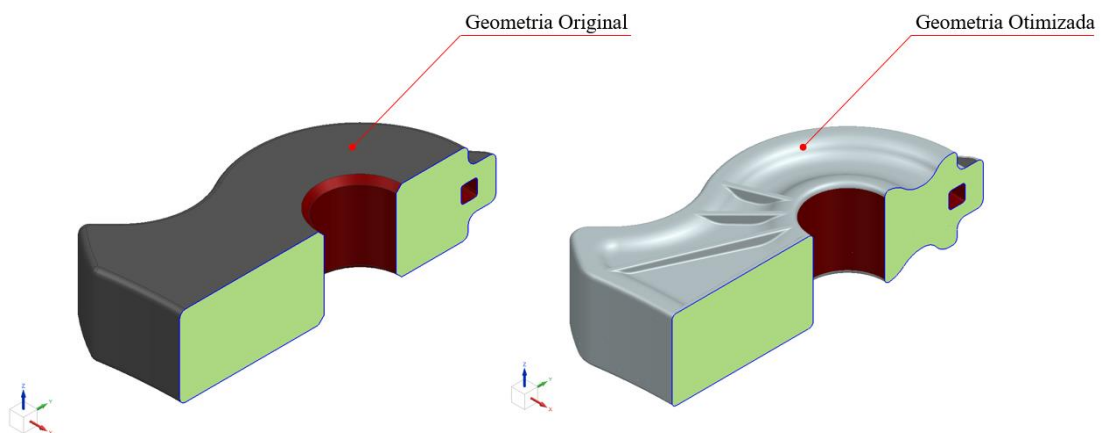
Figura 37: Resultado da Otimização Topológica Pontos de Melhoria - ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Reparo de Erros:** O próximo passo envolve o reparo de qualquer erro identificado. Isso pode ser feito por meio de uma variedade de técnicas, dependendo do software CAD específico que está sendo utilizado. Por exemplo, algumas ferramentas possuem recursos automatizados de reparo, enquanto outras podem requerer ajustes manuais.

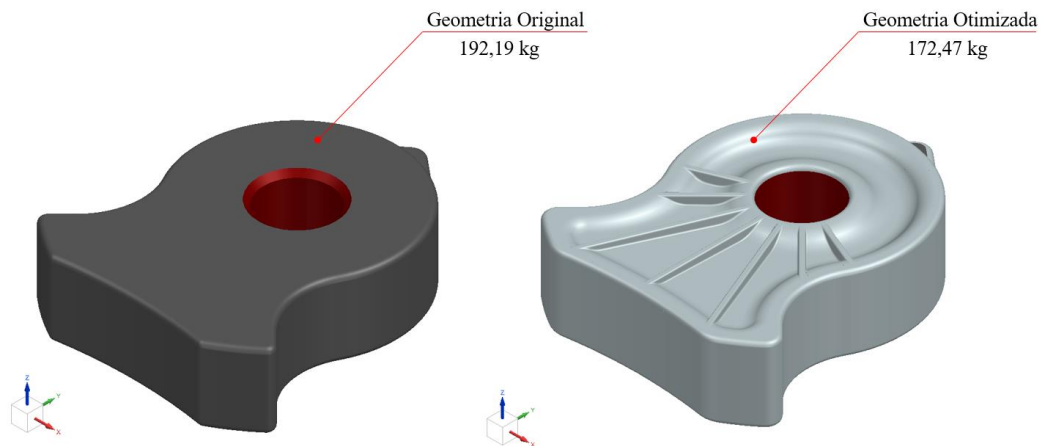
Figura 38: Reparo de Erros e Refinamento Geométrico



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Refinamento:** Nesta fase, o modelo é aprimorado para alcançar a qualidade desejada. Isso pode envolver o ajuste da geometria para torná-la mais suave ou precisa, ou a otimização da topologia para melhorar a eficiência do modelo.

Figura 39: Refinamento Geométrico

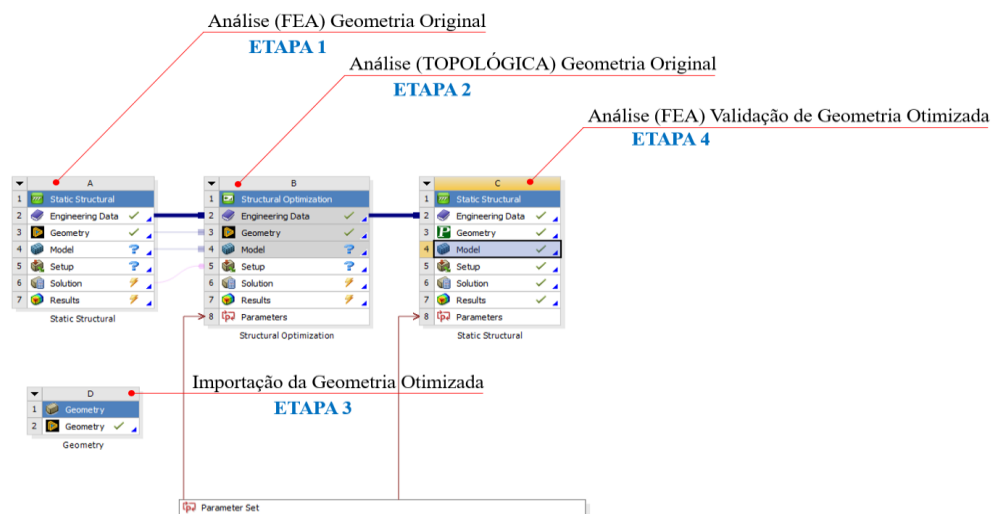


Fonte: Do Autor, (2023)

Após a análise topológica, o refinamento geométrico é realizado para melhorar a precisão e os detalhes do modelo. Isso pode envolver o aumento da densidade da malha do modelo, a suavização de superfícies, a adição de detalhes mais finos, ou a correção de erros identificados na análise topológica.

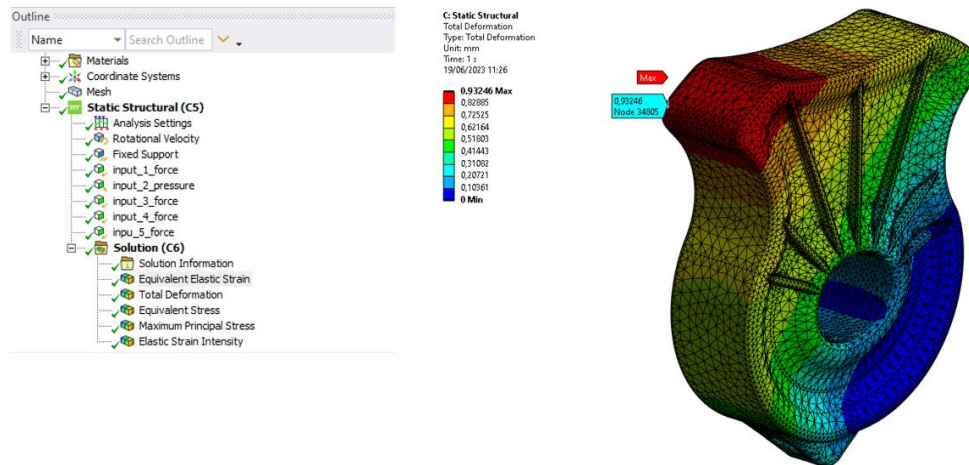
- **Validação:** Após o refinamento, o modelo é verificado novamente para garantir que todos os problemas foram resolvidos e que ele atende aos critérios desejados.

Figura 40: Acoplamento de Análises Para Validação no Ambiente – ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

Figura 41: Análise (FEA) Para Validação do Modelo Otimizado (Aço Nano Bainítico)



Fonte: Do Autor, (2023)

Com base nos resultados da análise do ANSYS, podemos identificar as áreas que precisam de refinamento geométrico. Esta etapa envolveu várias iterações de refinamento e validação. Aqui estão algumas estratégias usadas para o refinamento geométrico aqui demonstrado:

- **Refinamento de Malha:** Foi usado o refinamento da malha em áreas de alta tensão ou deformação. Uma malha mais fina nessas áreas pode resultar em resultados de simulação mais precisos.
- **Modificação da Geometria:** Foram feitas alterações na geometria do martelo triturador para melhorar seu desempenho. Isso envolveu a alteração da espessura, largura, comprimento, ou outros parâmetros geométricos.
- **Melhoria dos Materiais:** Com base nos resultados da simulação, foram feitas as intervenções geométricas e para a sequência do trabalho que não será demonstrada aqui pois irá ser proposto o uso do aço - nano bainítico e será sugerida a melhoria do tratamento térmico para aumentar a resistência e a vida útil do martelo triturador.

É importante lembrar que este é um processo iterativo, e várias rodadas de análise e refinamento podem ser necessárias para alcançar o resultado desejado. Além disso, o processo específico pode variar dependendo do software CAD usado e da natureza do modelo que está sendo trabalhado.

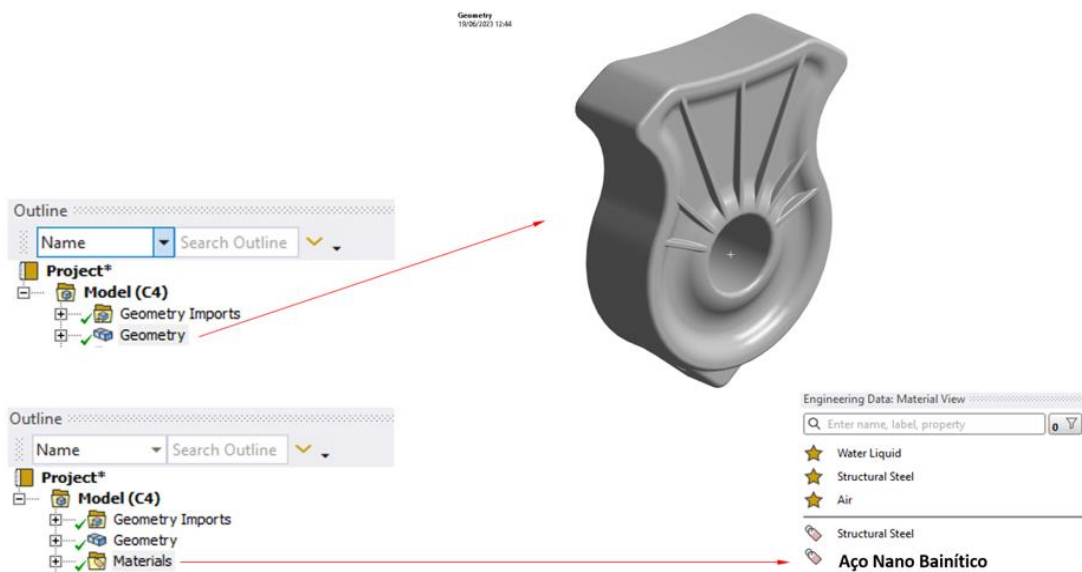
6 - Validação do Modelo Otimizado por MEF - ANSYS Workbench

A Validação do Modelo Otimizado pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma etapa crucial para garantir que os resultados de sua simulação sejam precisos e representem corretamente o comportamento real do sistema físico. No ANSYS Workbench, essa validação pode ser feita por meio de comparação com dados experimentais, quando disponíveis, ou por verificação do modelo e das condições de contorno.

Após a OT uma nova análise por MEF foi executada no sentido de validar e liberar o modelo para fabricação e posterior experimentação em campo. Abaixo segue os passos para essa nova análise utilizando as mesmas condições de contorno do modelo original. Segue as etapas de análise:

- **Verificação do Modelo:** Assegure-se de que a geometria, as condições de contorno, as propriedades dos materiais e a malha estão corretas e adequadas para o problema em questão.

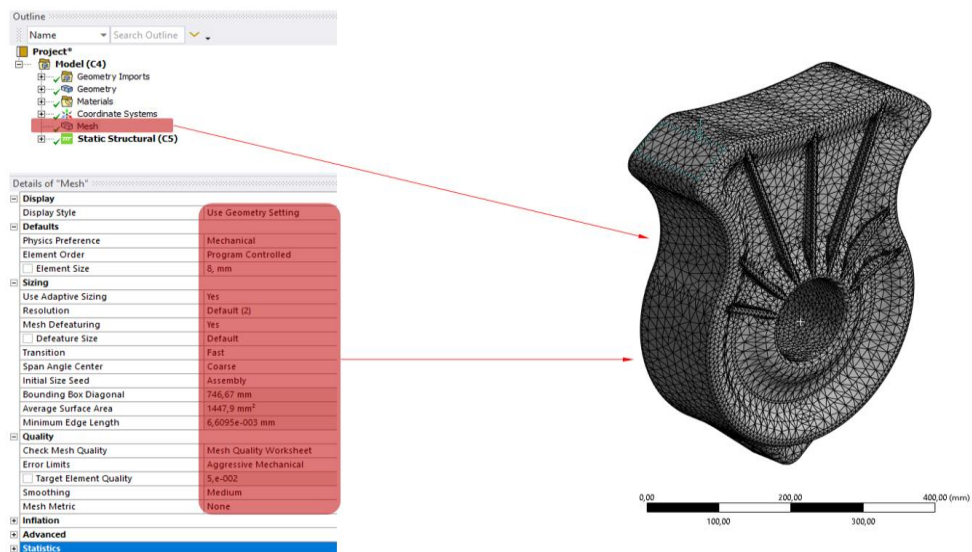
Figura 42: Análise (FEA) Para Validação do Modelo – ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Sensibilidade da Malha:** Realize uma análise de sensibilidade da malha para determinar se sua malha é suficientemente refinada. Isso pode ser feito executando a análise com malhas de diferentes densidades e verificando se os resultados convergem.

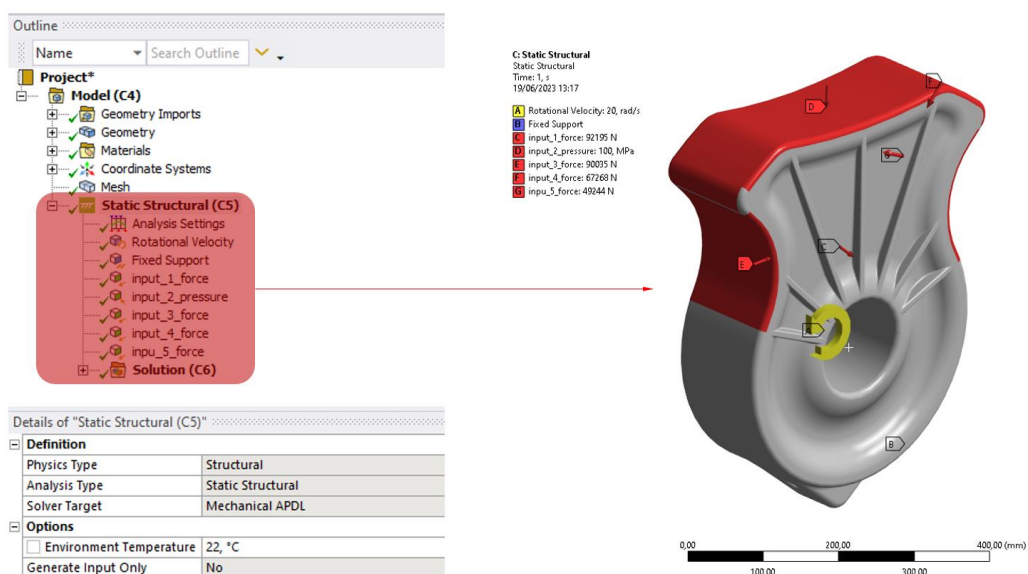
Figura 43: Configuração de Malha Validação do Modelo – ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

- **Configuração das Condições de Contorno:** Em uma análise de Método de Elementos Finitos (MEF) no ANSYS é crucial para o sucesso de sua simulação. As condições de contorno podem incluir restrições, cargas, pressões, temperaturas, entre outros, dependendo do tipo de análise que você está cumprindo. **Estas mesmas condições foram consideradas para o modelo anterior.**

Figura 44: Configuração das Condições de Contorno – ANSYS Workbench



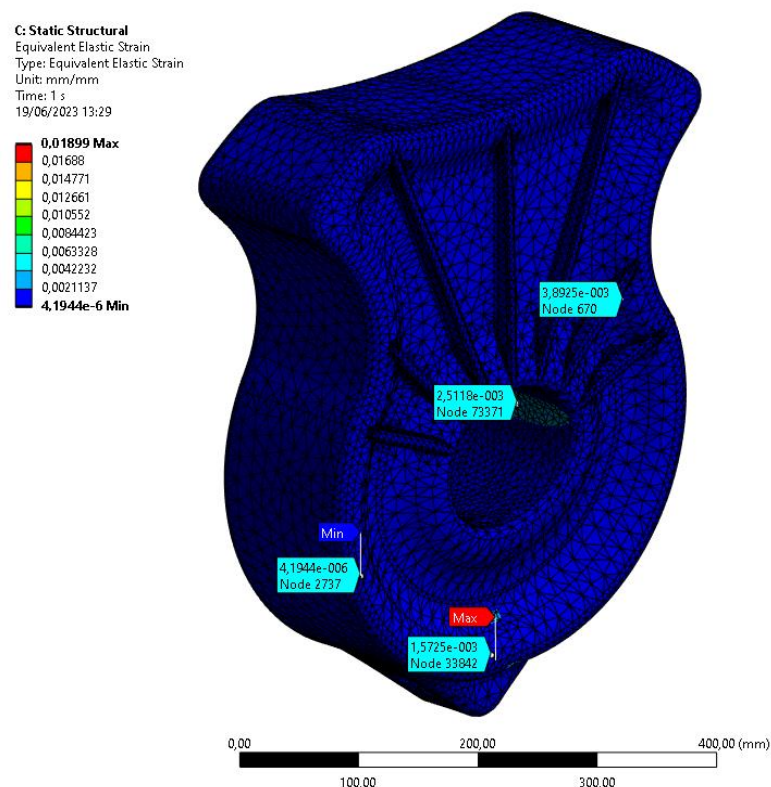
Fonte: Do Autor, (2023)

Interpretação dos resultados de uma análise de Método de Elementos Finitos (MEF) no ANSYS requer uma compreensão sólida da física do problema que você está tentando resolver, bem como o significado dos diferentes tipos de resultados que o ANSYS pode gerar. Abaixo temos a conclusão da análise para validação do modelo:

6.1 Magnitude Equivalente de Deformação Elástica (Modelo Otimizado)

O equivalente de deformação elástica é um conceito fundamental em mecânica dos materiais e teoria da elasticidade. É uma medida da deformação total em um material, comparando seu estado atual com um estado não deformado. Baseia-se na teoria da plasticidade de Von Mises, considerando todas as dimensões de deformação e levando em conta as deformações de cisalhamento. É amplamente utilizado em engenharia de materiais e análise de elementos finitos para avaliar o comportamento dos materiais sob diferentes carregamentos complexos. O cálculo do equivalente de deformação elástica envolve coeficientes de deformação, derivados das leis de conservação de momento e energia, e pode ser expresso de várias formas com base nas condições de contorno e sistema de coordenadas utilizados.

Figura 45: Resultado da Magnitude Equivalente Deformação Elástica – ANSYS Workbench



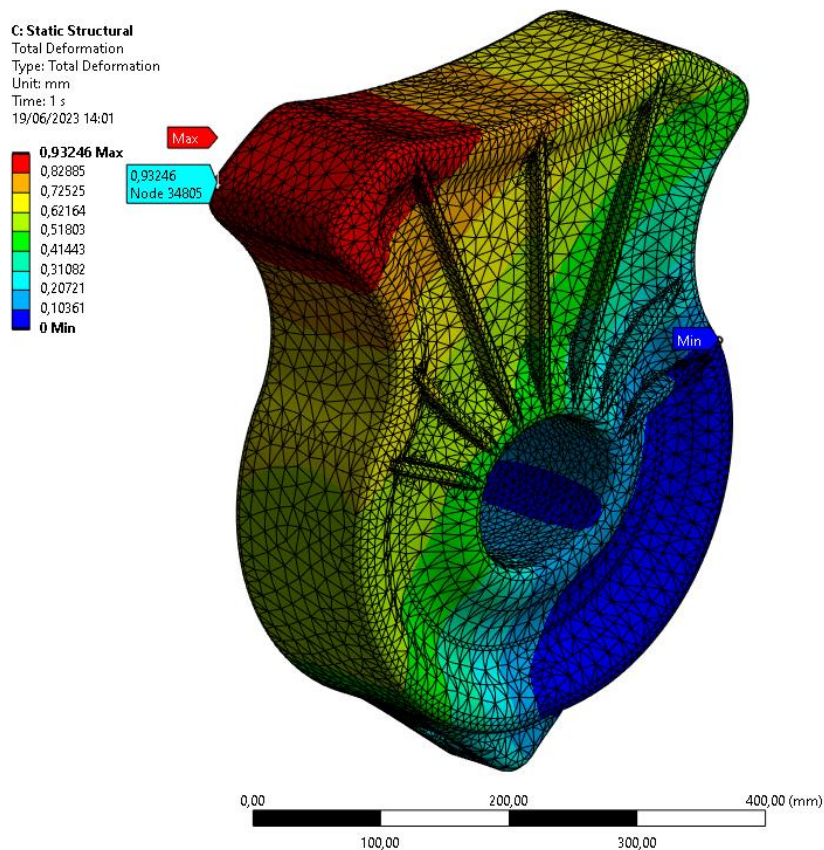
Fonte: Do Autor, (2023)

A deformação máxima neste ponto se mostra abaixo do permitido, o que valida o modelo para fabricação, pois conforme especificação do fabricante o valor está abaixo de 0.3% conforme o recomendado. Vale ressaltar que o primeiro protótipo otimizado será manufaturado em Aço Nano Bainítico e será validado em campo.

6.2 Deformação Total (Modelo Otimizado)

A deformação total é um dos principais parâmetros de interesse em uma análise de elementos finitos no ANSYS. Ela é a soma da deformação elástica (recuperável) e da deformação plástica (permanente) no material sob a carga aplicada. A deformação total permite que você veja o quanto a estrutura se desloca ou deforma em resposta à carga.

Figura 46: Deformação Total – ANSYS Workbench



Fonte: Do Autor, (2023)

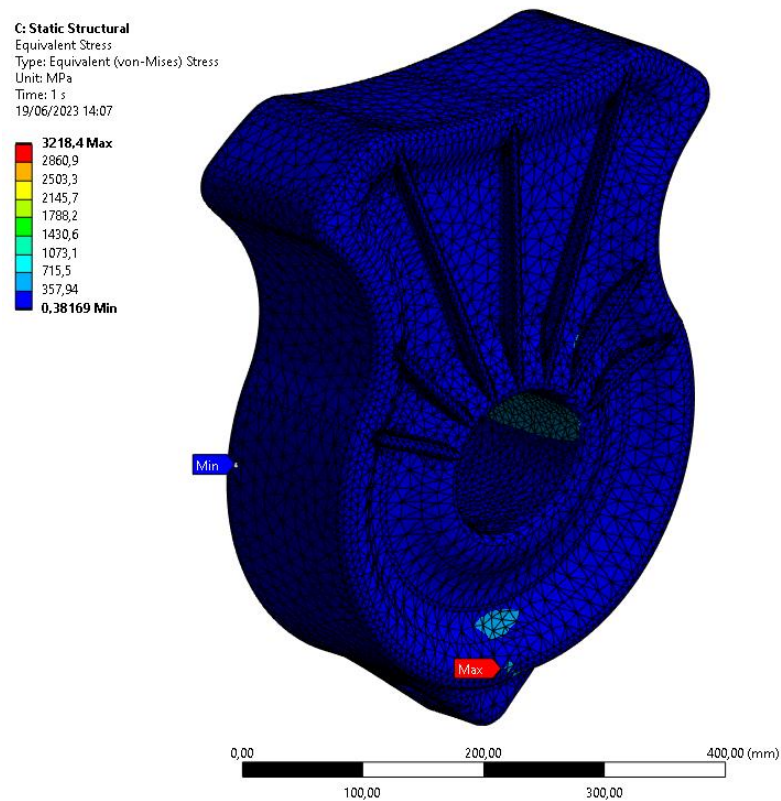
Neste trabalho a deformação total apresentada após o refinamento da geometria otimizada cumpre de forma correta os requisitos de trabalho exigidos. Como podemos verificar a imagem acima demonstra o correto deslocamento levando em conta a face de trabalho que estará sujeita a maior carga de impacto durante a operação sem comprometer o

pivotamento do martelo em relação ao eixo de trabalho. Deve-se observar que no modelo anterior a OT essa deformação estava impactando diretamente na parede do furo o que estava contribuindo para a falha do componente.

6.3 Tensão Equivalente (Von-Misses) - (Modelo Otimizado)

A tensão equivalente de Von Mises é frequentemente usada em análises de resistência dos materiais para comparar um estado complexo de tensão tridimensional com um estado de tensão unidimensional. Esta tensão é usada para determinar o início do escoamento (deformação plástica) no material sob carregamento complexo.

Figura 47: Tensão Equivalente (Von-Misses) – ANSYS Workbench



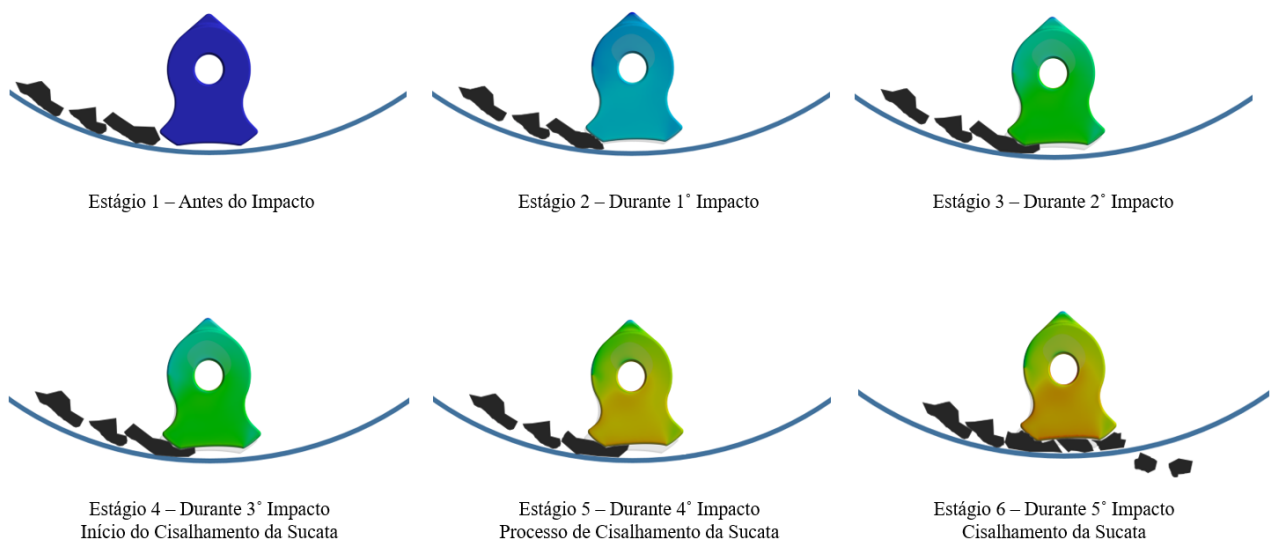
Fonte: Do Autor, (2023)

Para este resultado observa-se que o componente se comportou de maneira totalmente satisfatória e isso implica na factibilidade da manufatura do componente. Pois durante a análise não foi detectada nenhuma anomalia estrutural que deva resultar em possíveis falhas de campo.

6.4 Variação da Tensão - Análise 1 do Processo de Trituração (Aço Manganês)

Análise do processo de trituração 1 ver figura 48 os estados de tensão do martelo e do material triturado durante o processo de trituração. Com base nos estados de força do material triturado e do martelo, todo o processo de trituração pode ser dividido em seis etapas. Conforme figura 48, o martelo e o material de trituração se movem independentemente.

Figura 48: Análise do Processo de Trituração 1 (Von-Misses) – ANSYS Workbench Rocky 3D



Fonte: Do Autor, (2023)

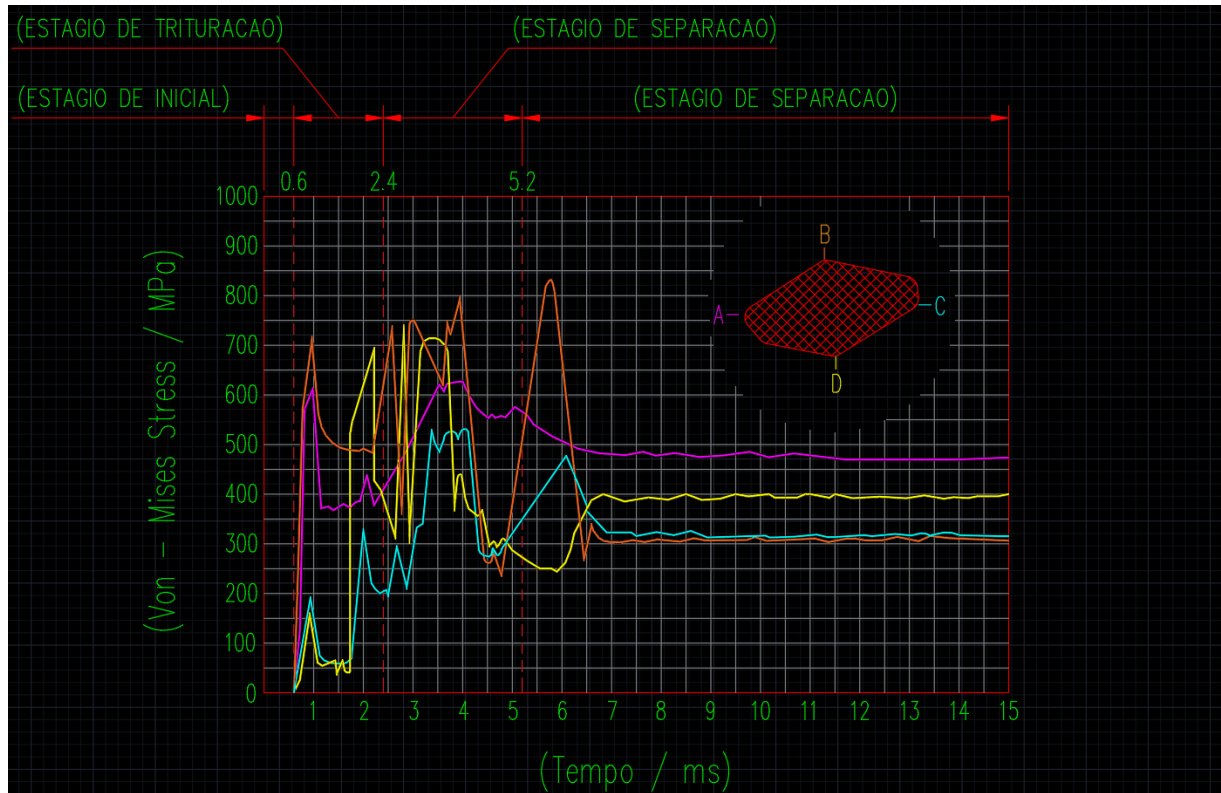
O martelo gira em torno do eixo Z e o material triturado move-se a uma velocidade definida. A figura 48 ilustra o primeiro impacto entre o martelo e o material triturado. Após o primeiro impacto, o material continua na câmara de trituração até ser cisalhado.

Após várias colisões entre o martelo e a parede da câmara de trituração, o material triturado pelo martelo e pela parede da câmara, a sucata é puxada com velocidade controlada, no início do ciclo a sucata se deforma até que o cisalhamento começa a ocorrer. Após o movimento giratório do martelo e a conclusão do processo de trituração, o material a ser triturado é liberado da cavidade da câmara de forma sequencial, como ilustrado na figura 48. Durante esse processo, o material se separa do martelo e da cavidade, permitindo que seja descarregado adequadamente para a próxima etapa ou para a coleta final.

Para tornar o processo de trituração mais claro, quatro nodos (nós) no material a ser triturado foram escolhidos para analisar suas variações de tensão, conforme mostrado no gráfico 1. A e C são dois nodos (nós) nas extremidades do material a ser triturado. B e D são dois nodos (nós) na parte superior e inferior. As mesmas tendências de variação de tensão dos

quatro nodos podem ser encontradas no gráfico 1. Durante o tempo de 0-0,6 ms, a tensão do material a ser triturado será zero porque ele se move independentemente do martelo. Essa etapa pode ser chamada de etapa inicial.

Grafico 01: Análise do Processo de Trituração 1 (Von-Misses) – ANSYS Workbench Rocky 3D



Fonte: Do Autor, (2023)

No momento aproximado de 1ms, a tensão do material a ser triturado aumentou acentuadamente, pois o material a ser triturado e o martelo impactaram pela primeira vez. O impacto foi forte e o tempo de colisão foi curto. Durante o tempo de 1 a 1,8 ms, a tensão do material a ser triturado estava quase inalterada porque o material a ser triturado estava se dirigindo à cavidade da câmara de trituração. No momento de 1,5 ms, a tensão de A e D aumentou devido ao seu impacto com o martelo. Como o material ficou imóvel e a energia cinética do material a ser triturado era bastante baixa após a primeira colisão, a tensão de A e D variaram a resistência e a tensão de B e C permaneceram as mesmas. No ponto de 2ms, o material a ser triturado impacta o martelo novamente.

Durante o tempo de 2,4 a 3,7 ms, a tensão variou mais frequentemente do que antes porque o espaço entre a cabeça do martelo e a cavidade da câmara de trituração estava ficando menor, o que é mais difícil para o material a ser triturado cisalhar entre eles, e então áreas em torno das pressões de B e D foram extrudadas sequencialmente, enquanto o tempo de colisão

era muito curto para a tensão de A e C mudar. Durante o tempo de 3,7 a 4,5 ms, todas as tensões dos nodos permaneceram estáveis e bastante baixas principalmente porque a deformação do material a ser triturado aumentou. No ponto de 4,9 ms, as tensões de todos os nodos variaram drasticamente, especialmente, o nodo B.

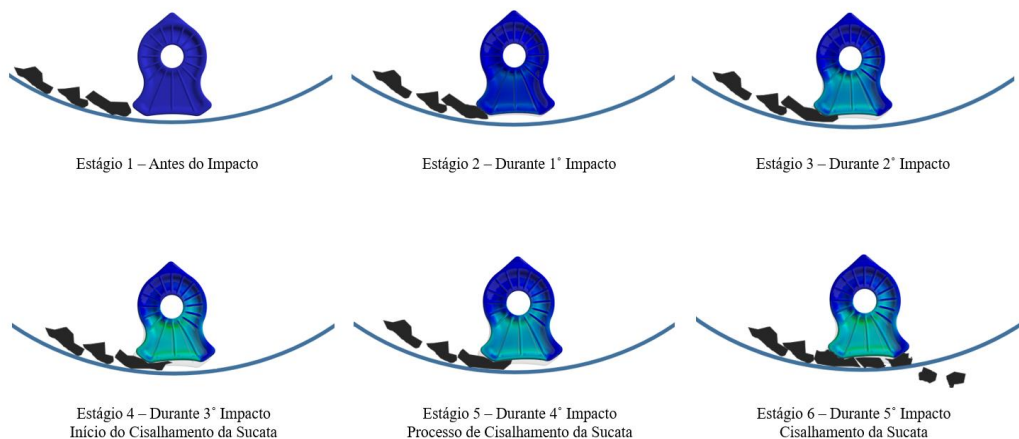
Evidentemente, o material a ser triturado retorna à cabeça do martelo mais uma vez e o ponto de força está próximo à área ao redor da posição do nodo B. Esta etapa em que o material a ser triturado é triturado e impactado pelo martelo na câmara de trituração é chamada de etapa de cisalhamento final da sucata. A tensão do material a ser triturado durante esta fase permanece a mais alta. Portanto, para otimizar a estrutura do martelo e prolongar esta fase podemos melhorar a eficiência da trituração trabalhando na composição da liga do material do martelo e no tipo de tratamento térmico a ser aplicado durante a etapa de manufatura do componente aqui estudado.

Após o tempo de 5,2 ms, a tensão do material a ser triturado caiu, pois a sucata a ser triturada não tinha energia cinética suficiente para retornar à câmara de moagem e se mover independentemente para o próximo processo de trituração. Esta etapa é chamada de separação. Para reduzir o tempo de trituração e aumentar a eficiência geral da trituração, esta etapa deve ser encurtada com a adição de martelos mais eficientes e menos espaçados entre si pois a máquina permite alterações em sua configuração e disposição dos martelos.

6.5 Variação da Tensão (Aço Manganês X Aço Nano Bainítico)

O método de OT e mudança de material foram utilizados para otimizar a estrutura do martelo e atender aos requisitos de alta eficiência e longa vida útil. Aqui, tanto a eficiência de trituração quanto o grau de dano dos martelos foram analisados.

Figura 49: Análise do Processo de Trituração 2 (Von-Misses) – ANSYS Workbench Rocky 3D



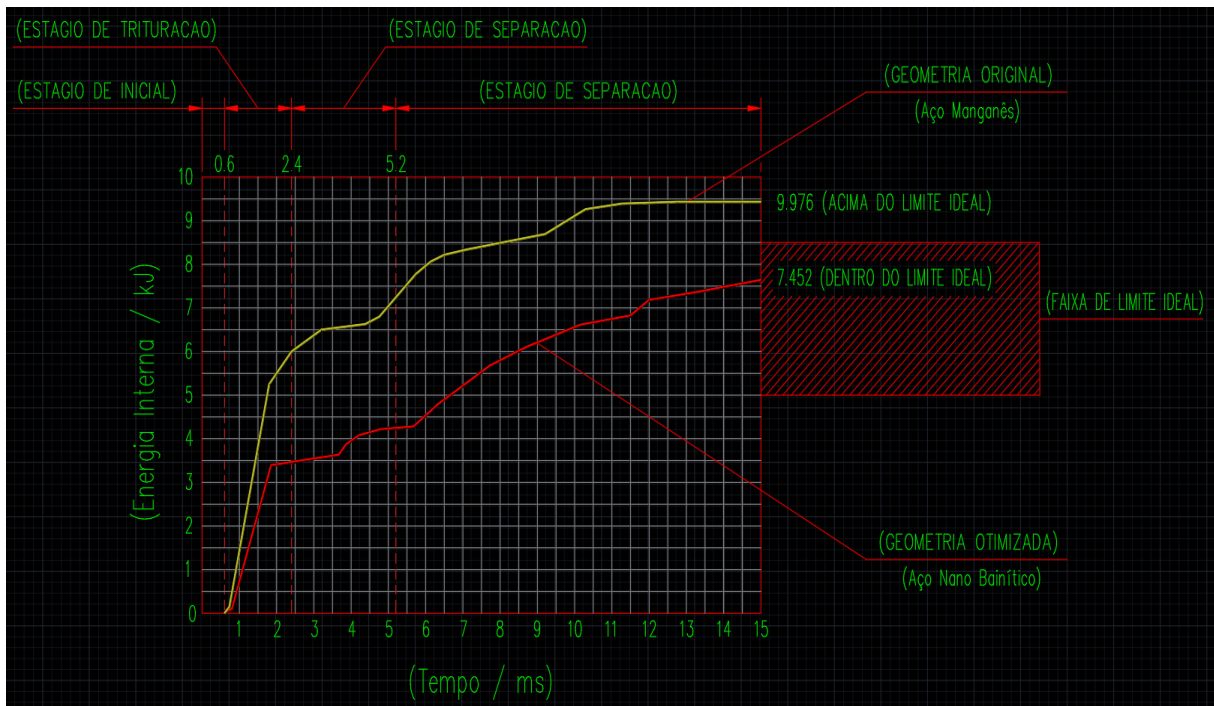
Fonte: Do Autor, (2023)

Análise da eficiência de trituração, o gráfico 02 mostra as variações de energia interna dos materiais a serem triturados quando triturados por dois martelos diferentes sendo eles: O primeiro martelo feito em aço manganês e o segundo martelo feito em Aço Nano Bainítico tendo a sua geometria passado por otimização topológica conforme demonstrado no trabalho.

Foi assumido que a energia inicial dos materiais a serem triturados é zero. O material a ser triturado absorve a energia durante a colisão sendo que a trituração com o martelo e a câmara de moagem ajudam a dissipar essa energia durante o processo. Quando a energia interna do material a ser triturado alcança o nível ideal de energia, a sucata é submetida ao cisalhamento pleno e com isso temos o ciclo de trabalho completo. Porém é interessante perceber as variações ocorridas nos dois componentes durante o processo. E com isso podemos mensurar as variações de energia interna no ambiente de simulação afim de se fazer observações e propor outras melhorias no projeto.

Devemos entender que quanto mais parâmetros forem medidos durante um processo de melhoria ou concepção de um novo projeto, mais caro ele fica, em contrapartida quanto maior forem as variáveis medidas mais opções de melhoria temos e assim podemos adequar de maneira melhor os componentes projetados e estudados as condições de aplicação a qual ele estará sujeito.

Gráfico 02: Curva de Variação da Energia Interna (Proc. 1/2) – ANSYS Workbench Rocky 3D



Fonte: Do Autor, (2023)

A quantidade de energia que um martelo triturador de sucata deve absorver é uma questão complexa e depende de vários fatores. Em termos gerais, podemos considerar os seguintes aspectos:

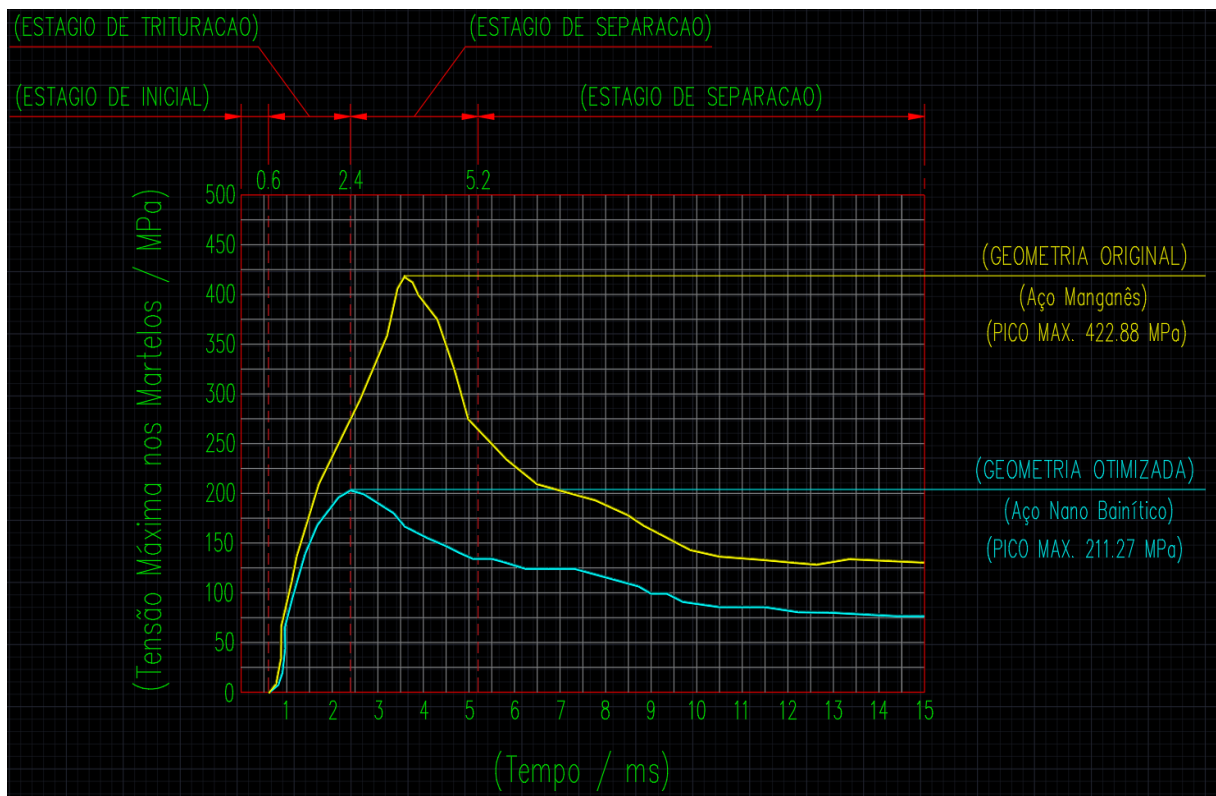
- **Eficiência de Energia:** Se o martelo absorve menos energia do impacto, isso pode indicar que mais energia está sendo gerada para a sucata, o que poderia melhorar a eficiência do processo de trituração.
- **Durabilidade do martelo:** Por outro lado, se o martelo absorve muito da energia do impacto, isso poderia levar a um desgaste mais rápido do martelo, atraindo sua vida útil.
- **Segurança:** Absorvedor de mais energia pode reduzir a possibilidade de fragmentos perigosos serem lançados durante o processo de trituração.

Portanto, a quantidade de energia que o martelo triturador de sucata deve absorver depende de um equilíbrio entre a eficiência do processo de trituração, a durabilidade do martelo e a segurança durante o processo. Uma análise cuidadosa desses fatores pode ajudar a determinar a configuração ideal.

O gráfico 03 mostra a tensão máxima nos dois martelos durante a trituração. Eles tiveram variações de tensão máxima diferentes. A tensão máxima no martelo manufaturado em aço manganês aumentou acentuadamente quando os efeitos da trituração ocorreram.

Durante a etapa de moagem, a amplitude de variação da tensão máxima era menor e tinha um tempo de duração maior do que a etapa de colisão. No entanto, com diferentes estruturas de martelo, havia várias distinções na tensão máxima (incluindo as posições dos martelos na câmara de moagem e a variação geométrica da sucata) durante a trituração.

Grafico 03: Análise do Processo de Trituração 1/2 (Tensão Máxima)



Fonte: Do Autor, (2023)

Os resultados demonstraram que o martelo triturador de sucata otimizado geometricamente e feito de aço nano bainítico apresentou variações de tensão máxima menores em comparação com o martelo triturador de sucata feito de aço manganês.

Isso sugere que a utilização de aço nano bainítico, juntamente com a otimização topológica, pode oferecer melhorias em termos de eficiência e durabilidade do martelo. O aço nano bainítico, é conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas e de resistência ao desgaste, aliado a um design otimizado, conseguiu gerenciar e distribuir eficientemente as tensões geradas durante o processo de trituração.

Portanto, é considerado o uso de aço nano bainítico e otimizações de design no desenvolvimento de futuros martelos trituradores de sucata para obter um desempenho superior. Isso pode resultar em maior eficiência do processo de trituração, melhor vida útil do martelo e, conseqüentemente, redução dos custos operacionais e de manutenção.

Para confirmar essas teorias teóricas, a próxima etapa deste projeto envolverá a fabricação de protótipos de martelos trituradores de sucata em aço nano bainítico. Estes serão então testados em condições de campo reais, permitindo uma avaliação prática do seu desempenho.

Espera-se que os resultados destes testes em campo corroborem as descobertas teóricas deste trabalho de conclusão de curso, validando o uso do aço nano bainítico e otimização como estratégias viáveis para melhorar o desempenho dos martelos trituradores de sucata. Este trabalho tem o potencial de contribuir significativamente para a indústria de reciclagem, oferecendo uma solução eficaz para aumentar a eficiência e reduzir os custos operacionais e de manutenção.

7 - Resultados e Discussões

O cálculo por MEF executado na plataforma ANSYS Workbench atuou como uma ferramenta de comprovação e consentimento dos entes envolvido para o estudo e elaboração de um novo projeto tendo em vista que a fratura e o desgaste limitaram o uso de aços manganês austeníticos no martelo triturador. As razões para a fratura e desgaste desses martelos estão relacionadas a vários fatores, como a falta de dureza e resistência ao desgaste do aço manganês austenítico, têmpera inadequada, baixo rendimento e resistência à tração, crescimento de carboneto na temperatura de operação, porosidades oriundas do processo de fundição e falta de encruamento a temperaturas entre 200 e 300 °C. O aço CFB 1.6511, com maior resistência, resistência adequada ao desgaste e trincas por fadiga, bem como estabilidade na faixa de temperatura do processo, é uma alternativa adequada para os aços austenita-manganês. Na prática, o uso de aço CFB no dispositivo triturador seria uma alternativa no sentido de aumentar a vida útil do martelo para 2.000 horas.

Podemos adotar outras duas soluções para o problema de fratura e desgaste de um martelo triturador de austenita manganês. Uma delas é a mudança no design do formato do martelo de tal forma que a probabilidade de encravar peças de sucata entre o martelo e o corpo do dispositivo triturador e o desgaste seja minimizada, Zhou et al. em um estudo, com as mudanças na forma do martelo, muito contribuiu para o desempenho desses martelos.

Outra é que a escolha do material do martelo triturador é das ligas mais resistentes à fratura e ao desgaste. A microestrutura dos aços CFB inclui ferrita bainítica e austenita retida. Assim, devido à sua microestrutura, evita o crescimento de trincas no aço e proporciona boa resistência ao desgaste e à fadiga. Eles também têm alta resistência ao escoamento devido à sua nanoestrutura. Estudos apontam que, o limite de escoamento e a dureza do aço bainítico nano estruturado é maior do que o aço manganês austenítico. Por outro lado, devido ao maior coeficiente de resiliência (a área abaixo do diagrama de tensão e deformação na região elástica), o aço nano bainítico livre de carboneto será melhor que os aços manganês austeníticos.

Quanto a aplicação da otimização topológica realizada neste trabalho a técnica teve como objetivo identificar a melhor configuração estrutural para o martelo triturador e diminuir seu peso. Ao utilizar o software ANSYS, fomos capazes de simular os cenários de carga recolhidos em campo e aplicar as restrições necessárias, maximizando a eficiência estrutural do design, suportando o peso e mantendo a integridade e a funcionalidade da peça. Tivemos uma redução de aproximadamente 20 kg do componente o que nos ajuda na otimização dos custos e diminui de forma significativa o peso no eixo de trabalho da máquina.

Os resultados da otimização topológica alcançaram um potencial significativo para melhorias na eficiência do projeto do martelo triturador. Com a utilização desta metodologia, consegui alcançar uma redução de peso de 10,26% como já mencionado no parágrafo anterior em relação ao design original, sem comprometer a resistência ou a durabilidade da peça. Através da análise de tensão de Von Mises, foi possível verificar que mesmo sob as condições de operação mais severas, a tensão no componente registrando uma tensão máxima abaixo do limite de escoamento do material. Isto indica que o design otimizado pode suportar as operações operacionais sem o risco de falha por deformação plástica.

O projeto finalizado passou por uma série de testes de validação no ambiente do ANSYS Workbench, nos quais confirmamos que a solução otimizada atende a todos os requisitos de trabalho alcançados.

Concluimos, portanto, que a otimização topológica é uma ferramenta valiosa no projeto de componentes desenvolvidos, capaz de fornecer soluções eficientes e eficazes. Espero que os insights obtidos neste trabalho possam servir como base para futuras pesquisas e desenvolvimentos no campo da engenharia estrutural.

8 - Conclusão

Este trabalho explorou a otimização topológica e o uso de aço nano bainítico em martelos trituradores de sucata, em contraste com o comum aço manganês. A combinação dessas abordagens pode melhorar a eficiência e durabilidade dos martelos, devido à resistência excepcional ao desgaste e propriedades mecânicas do aço nano bainítico, bem como à distribuição de tensão mais eficiente pela otimização topológica. A fabricação de protótipos desses martelos será realizada para validar as descobertas e testar seu desempenho em condições reais. Caso confirmadas, essas vantagens podem representar uma solução promissora na indústria de reciclagem de sucata, proporcionando alternativas mais eficientes e resistentes para os martelos atuais feitos de aço manganês, com possíveis aplicações em outras áreas que demandem resistência ao desgaste e distribuição de estresse eficiente.

9 - Referência Bibliográfica

ALMEIDA, V. S., SIMONETTI, H. L., & NETO, L. O. (2013). Comparative analysis of strut-and-tie models using Smooth Evolutionary Structural Optimization. *Engineering Structures*, 56, 1665-1675.

AMERICA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A240 / A240 M. Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DeWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. *Mecânica dos materiais*. 8. ed. McGraw Hill. 2017.

Bibliografia Consultada ALVES FILHO, Avelino. - Elementos finitos: A Base da Tecnologia CAE. 1ª edição. São Paulo: Érica, 2000.

BRUSA E, MORSUT S, BOSSO N. Dynamic behavior and prevention of the damage of material of the massive hammer of the scrap shredding machine[J]. *Meccanica*, 2014, 49: 575–586.

CALLISTER JR, William D, RETHWISCH, David G. *Ciência e engenharia de materiais – uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

AKAVCI, S. SEREN, HUSEYIN R. YERLI E ALI DOGAN. "A teoria da deformação de cisalhamento de primeira ordem para placas compostas laminadas simetricamente em fundação elástica." *Arabian Journal for Science and Engineering* 32.2 (2007): 341.

EN 1993-1-8 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

HUTCHINGS, I. M. (1992) 'Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials'. Edward Arnold, London.

IESSS. *Notas de aula: Mecânica da Fratura e Análise de Fadiga*. São Paulo, SP - Brasil: IESSS, 2018.

IESSS. *Notas de aula: MEF e Geração de Malhas*. São Paulo, SP - Brasil: IESSS, 2018.

KIRCHNER J, TIMMEL G, SCHUBERT G. Comminution of metals in shredders with horizontally and vertically mounted rotors-microprocesses and parameters[J]. *Powder Technol*, 1999, 105: 274–281

LI JUN, LIU JIANGXIONG, YANG BANGCHENG, et al. Research on energy consumption of light metal scrap shredding process[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 48(2): 71–77.

S. KUYUCAK, R. ZAVADIL, V. GERTSMAN, Heat-treatment processing of austenitic manganese steels, *Rev. Turnatorie Romanian Foundry J.* 10 (2004) 11–14.

S. SANDER, G. SCHUBERT, Size reduction of metals by means of swing-hammer shredders, *Chem. Eng. Technol. Ind. Chem. Equipment-Process Eng.* 26 (2003) 409–415.

SANDER S, SCHUBERT G, JACKEL H G. The fundamentals of the comminution of metals in shredders of the swing-hammer type[J]. *Int. J. Miner. Process*, 2004, 74S: S385–S393.

SAADLAOUI Y., MILAN, J.L., ROSSI, J.M., CHABRAND, P. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. *Journal of manufacturing systems*. Elsevier. v.43, p.178-186. 2017.

SIMONETTI, H. L., ALMEIDA, V. S., & DE OLIVEIRA NETO, L. (2014). A smooth evolutionary structural optimization procedure applied to plane stress problem. *Engineering structures*, 75, 248-258.

SHIGLEY, Edward. *Elementos de Maquinas de Shigly: Projeto de Engenharia Mecânica*. 8. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011.

SHERRATT, D. N. B. & D. F. *Finite Element Based Fatigue Calculations*. 1. ed. Farnham, UK, Dr NWM Bishop, 2000.

SIGMUND, O. On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization. *Mechanics of Structures and Machines*, v. 25, n. 4, p. 495-526. 2014.

SIGMUND Oe; PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh dependencies and local minima. *Structural Optimization*, v. 16, p. 68–75. 1998.

SILVA, E. C. N. *Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas (Apostila)*. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 2001.

SIMONETTI, H.L. *Otimização Topológica de Estruturas Bidimensionais*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

SUGARMAN, J., MCCRORY, DC, POWELL, D., KRASNY, A., ADAMS, B., BALL, E., ... & STRAUSS, M. (2002).

SURESH, S. (1998) *Fadiga de Materiais*. 2ª edição, Cambridge University Press.

TAO, L. HUA, Study on the stress characteristic and fatigue life of the shredder pin, *Eng. Fail. Anal.* 59 (2016) 444–455.

T. SOURMAIL, V. SMANIO, C. ZIEGLER, V. HEUER, M. KUNTZ, F. CABALLERO, C. GARCIA-MATEO, J. CORNIDE, R. ELVIRA, A. LEIRO, E. VUORINEN, T. Teeri, Novel nanostructured bainitic steel grades to answer the need for high-performance steel components (Nanobain), *Res. Innovat.* (2013), <https://doi.org/10.2777/958>.

U FISCHER, R GOMERINGER, M HEINZLER, R KILGUS, F NÄHER, S OESTERLE, H PAETZOLD, A STEPHAN
2010.

X. ZHOU, Z. HU, X. QIN, Y. E. BRUSA, S. MORSUT, N. BOSSO, Dynamic behavior and prevention of the damage of material of the massive hammer of the scrap shredding machine, *Mechanical*. 49 (2014) 575–586.