

PESQUISA APLICADA

univinte



ORGANIZADORES

Expedito Michels

Rodolfo Lucas Bortoluzzi

Andreza dos Santos



EDITORA FUCAP

ORGANIZADORES

RODOLFO LUCAS BORTOLUZZI

EXPEDITO MICHELS

ANDREZA DOS SANTOS

PESQUISA APLICADA UNIVINTE



Copyright © 2021 by Editora FUCAP

Título: Pesquisa aplicada Univinte.

Organização: Rodolfo Lucas Bortoluzzi; Expedito Michels; Andreza dos Santos.

Capa: Jeferson da Silva Marcos.

Foto da capa: Projeto Baja – Expedito Michels.

Revisão: Dos Autores.

Editoração: Andreza dos Santos

CONSELHO EDITORIAL

Expedito Michels (Presidente)

Emillie Michels

Andreza dos Santos

Dr. Diego Passoni

Dr. José Antônio da Silva

Dr. Nelson G. Casagrande

Dr. Roberto M. da Silveira

Dr. Rodolfo Lucas Bortoluzzi

Dr. Rodrigo Luvizotto

Dra. Jamile Marques

Dr. Hamilcar Boing

Dra. Beatriz M. de Azevedo

Dra. Patrícia de Sá Freire

Dra. Joana Dar’c S. da Silva

Dra. Solange Maria da Silva

Dr. Paulo Cesar L. Esteves

Dra. Adriana C. Pinto Vieira

P436p

Pesquisa aplicada Univinte. / Expedito Michels; Rodolfo Lucas Bortoluzzi; Andreza dos Santos. (org.); Capivari de Baixo: Editora FUCAP, 2021.
321 p.

ISBN: 978-65-87169-16-3

1. Engenharia. I. Michels, Expedito. II. Bortoluzzi, Rodolfo Lucas. III. Santos, Andreza dos. IV. Título.

CDD 620

(Catalogação na fonte por Andreza dos Santos – CRB/14 866)

Editora FUCAP – Avenida Nilton Augusto Sachetti, nº 500 – Santo André, Capivari de Baixo/SC. CEP 88790-000.

Todos os Direitos reservados.

Proibidos a produção total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio.

A violação dos direitos de autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo art. 184 do Código Penal.

ORGANIZADORES

EXPEDITO MICHELS

Presidente da Sociedade Educacional de Capivari de Baixo, mantenedora da Faculdade Capivari, na qual também exerce a função de Diretor Geral. É Mestre em Administração Universitária pela Universidade Federal de Santa Catarina - PPGAU/UFSC, Bacharel em Administração e Especialista em Economia Empresarial, ambos pela Universidade do Sul de Santa Catarina. Foi Presidente da AMPESC - Associação das Mantenedoras Particulares de Santa Catarina, Conselheiro do Conselho Regional de Administração e Representante Estadual da ANGRAD no Estado de Santa Catarina. Tem experiência universitária desde 1989, atuando também como Professor e como Coordenador de curso. É Presidente da Academia de Letras do Brasil de Santa Catarina de Capivary.

RODOLFO LUCAS BORTOLUZZI

Bacharel em Química Tecnológica (UFSC), Administração de Empresas (FUCAP), Engenharia de Produção (FUCAP), Mestre em Química Analítica (UFSC). Possui ampla experiência na área de Química e Administração de Empresas, atuando principalmente nos seguintes temas: meio ambiente, administração de empresas na área de química, implantação de projetos industriais, pesquisa e desenvolvimento de novos produtos, desenvolvimento de softwares e firmwares para interface de equipamentos, softwares de uso científico e tecnológico. Atualmente dedicado a projetos de aprendizado de máquina, laboratórios virtuais de ensino, inteligência artificial e análise de dados. É Coordenador do Curso de Engenharia Civil da FUCAP-UNIVINTE.

ANDREZA DOS SANTOS

Bacharel em Biblioteconomia e Documentação pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Pós Graduada em Educação Especial Libras pela Faculdade FUCAP. Graduada em Direito pela Faculdade FUCAP. Membro e Secretária da Academia de Letras do Brasil de Santa Catarina de Capivary. Atua como Bibliotecaria da Faculdade FUCAP UNIVINTE.

PESQUISA APLICADA UNIVINTE

COLABORADORES

Anginaldo Claudino
Cristiano Silvano
Derek Manoel Luup Carvalho
Deyvid de Oliveira Borges
Edson Pereira Junior
Fabrício de Aguiar Joaquim
Guilherme Felácio Tavares
Gustavo Cabral de Medeiros
Jozuan Alexandre
Julia de Jesus Barcelos
Laiany Cardoso de Souza
Leonardo Gomes Goularte
Leonel Ricardo Luiza
Luiza Carolina Barbieri Pereira
Maicon Medeiros Mendes
Mario Souza Pacheco Junior
Matheus Aguiar de Souza
Pedro Bertuol Santos
Pedro José da Silva
Rodolfo Lucas Bortoluzzi
Tiago Cardoso Cesario
Willian Gilberto Duarte



Capivari de Baixo
2021

“A diferença entre o possível e o impossível está na
vontade humana.”¹

¹ Louis Pasteur – Cientista francês.

Apresentação

Nesta edição do livro “Pesquisa Aplicada Univinte”, apresentamos quatorze artigos de estudantes e professores dos Cursos de Engenharia da FUCAP Univinte.

Na instituição de educação superior, independente de suas formações ideológicas, a criatividade, o talento e a produção literária se fazem determinantes à consolidação de uma nova realidade. Neste sentido, a instrumentação científica aparece como sendo uma ferramenta eficaz no sentido de promover a amplitude de conhecimentos neste ambiente.

Seguimos, imbuídos do desejo de despertar em nossos alunos a iniciação científica na área de engenharia o mais cedo possível, principalmente enquanto partícipes do ambiente universitário.

Espera-se, portanto, que este material seja útil no sentido de contribuir com a produção de trabalhos científicos e, com toda a certeza, à orientação de uma vida acadêmica consistente com os ensejos de uma sociedade que se posiciona na era do conhecimento, formando cidadãos responsáveis, dedicados e de confiança.

Expedito Michels

Rodolfo Lucas Bortoluzzi

Andreza dos Santos

Sumário

INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DE USINAGEM SOBRE A RUGOSIDADE DO AÇO SAE 1045 15
Pedro José da Silva; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi.

ANÁLISE DE VIDA EM FADIGA DE UM EIXO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E O MÉTODO TENSÃO-VIDA..... 39
Edson Pereira Junior; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi.

ESTUDO DE TRAÇÃO EM MÉTODOS DE LIGAÇÃO DE PEÇAS 3D IMPRESSAS EM ABS 75
Julia de Jesus Barcelos; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.

FUNDIÇÃO DE PEÇAS DE METAL COM MOLDES EM PLÁSTICO PRODUZIDO POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA..... 95
Tiago C. Cesario; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.

MODIFICAÇÃO DE UM IMPLEMENTO AGRÍCOLA PARA DISTRIBUIÇÃO DE UREIA COM ENXADAS ROTATIVAS 111
Anginaldo Claudino; Gustavo Cabral de Medeiros; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LIGAS FUNDIDAS DE ALUMÍNIO A206.0 E A356 PARA APLICAÇÃO EM MANGA DE EIXO DE UM VEÍCULO BAJA SAE 131
Maicon M. Mendes; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.

ELETROFORMAÇÃO DE PEÇAS EM COBRE E NÍQUEL A PARTIR DE PEÇAS IMPRESSAS EM 3D 159
Rodolfo L. Bortoluzzi; Fabrício de A. Joaquim; Derek M. L. Carvalho.

DEFINIÇÃO DE UMA CURVA DE TEMPERATURA PARA TRATAMENTO TÉRMICO EM MATRIZ DE PARAFUSO FRANCÊS CONFORMADO A FRIO 175
Deyvid de O. Borges; Mario S. Pacheco Junior; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.

ESTUDO DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO NA MICROESTRUTURA DO AÇO SAE 1060 SOLDADO PELO PROCESSO SMAW	207
<i>Guilherme F. Tavares; Laiany C. de Souza; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi;</i>	
SISTEMA DE ALAVANCAS COM BARRAS	227
<i>Leonardo Gomes Goularte; Willian Gilberto Duarte; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.</i>	
CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE SOLDA DISSIMILAR ENTRE AÇO CARBONO E INOX PELO PROCESSO S.M.A.W.....	239
<i>Pedro Bertuol Santos; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi.</i>	
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA RUGOSIDADE DO AÇO SAE 1020 EM TORNEAMENTO	261
<i>Jozuan Alexandre; Cristiano Silvano; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi.</i>	
ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DA NORMA ABNT NBR 15575	281
<i>Luiza Carolina B. Pereira; Rodolfo L. Bortoluzzi; Derek M. L. Carvalho.</i>	
COMPARAÇÃO DE TRÊS MODELOS USUAIS DE TRELIÇA PARA COBERTURA METÁLICA	293
<i>Leonel Ricardo Luiza; Matheus A. de Souza; Derek M. L. Carvalho; Rodolfo L. Bortoluzzi.</i>	

INFLUÊNCIA DOS PARAMETROS DE USINAGEM SOBRE A RUGOSIDADE DO AÇO SAE 1045 TEMPERADO E REVENIDO

Pedro José da Silva¹
Derek Manoel Luup Carvalho²
Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Resumo: Este trabalho de conclusão de curso visa a análise da condição ideal de torneamento do aço SAE 1045 temperado e revenido. Para tal é feita a variação de parâmetros que compõem a execução da operação de usinagem de acabamento de uma peça. Esses parâmetros definem a condição de corte empregada pela ferramenta utilizada e levase em consideração diversos fatores para essa seleção. Parâmetros como: temperatura gerada pelo contato da ferramenta com a peça na remoção do material excedente, desgaste da ferramenta verificada com base na vida útil da mesma, determinada pelo fabricante, acabamento definido de acordo com o projeto e finalidade da peça e tempo de ciclo da operação. Esse trabalho tem o objetivo de analisar a influência dos parâmetros de corte no resultado de rugosidade e apontar a condição mais adequada para a usinagem em questão. Foram produzidos vinte e sete corpos de prova com a interação dos parâmetros de velocidade de corte (v_c), avanço transversal (f) e profundidade de corte (a_p) e verificado os níveis de rugosidade (R_a). Para esta análise foi utilizado a ferramenta ANOVA (análise de variância) e nos resultados comprovou-se existir a influência de todos os parâmetros de corte para esse processo de usinagem obtendo variações diferentes de acordo com a combinação destes avaliados. Finalmente foi demonstrado que há repetibilidade no experimento e que existe

¹ E-mail: manopedruca@gmail.com.

² E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

influência da dureza do material usinado sobre os resultados de rugosidade.

Palavras-chave: Torneamento. Usinagem dura. Rugosidade. Acabamento.

1 INTRODUÇÃO

Utilizado para a fabricação de componentes na indústria metalomecânica, nos mais variados segmentos, o aço SAE 1045 após tratamentos térmicos como têmpera e revenido, agrega propriedades mecânicas fundamentais para o destino de sua utilização, sendo a de maior destaque a elevação da dureza (Padilha, 1997). A têmpera e o revenido são tratamentos térmicos que tem como objetivo alterar a microestrutura do aço e por consequência as suas propriedades mecânicas. Este tratamento é necessário para a produção de eixos, pinos, engrenagens, dentre outros elementos de máquina. Após tratamentos térmicos, de acordo com as definições de projeto, pode haver necessidade da usinagem, no qual dimensões e acabamento superficial são ajustados. No processo de usinagem por torneamento é empregado o uso de ferramentas de corte para remover material e alcançar o formato desejado da peça. A remoção de material se dá pelo cisalhamento, culminando na formação de cavacos, e conforme esse processo, uma nova superfície vai sendo apresentada (Groover, 2016). Em relação ao acabamento da superfície da peça, o parâmetro de controle é a rugosidade, a qual desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, cuja influência supera a questão da aparência, sendo observada também quanto a qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, vedação, dentre outros. A ondulação produzida pela ferramenta de corte é o conjunto de irregularidades repetidas em forma de ondas de comprimento bem maior que a sua amplitude (Novaski, 2013). Sempre que uma operação de usinagem é realizada, o objetivo principal é produzir componentes com o máximo de funcionalidade e intercambialidade a baixo custo e alta produtividade. Em outras palavras, isso significa que

cada peça ou conjunto de um produto final seja feito de acordo com as especificações definidas quanto às dimensões, forma e acabamento da superfície. Este trabalho tem o objetivo analisar a influência dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade. Serão estudados a influência dos seguintes parâmetros: velocidade de corte (v_c), avanço transversal (f) e profundidade de corte (a_p) sobre a rugosidade (R_a) em aço SAE 1045 temperado e revenido.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral avaliar a influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade gerada na usinagem do aço SAE 1045 temperado e revenido. Como objetivos específicos podemos citar os seguintes:

- Identificar a melhor condição de trabalho com base na menor rugosidade encontrada;
- Determinar o conjunto de parâmetro de corte que resulta em rugosidade condizente com a operação de acabamento, de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4288, por meio de torneamento com tempo de ciclo mínimo;
- Com base nos resultados obtidos avaliar a repetitividade de resultado;
- Avaliar a influência da dureza do material sobre a rugosidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abordada neste Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo apresentar os conceitos básicos necessários para a compreensão sobre a importância da usinabilidade na indústria metal mecânica e dos tratamentos térmicos utilizados nesta pesquisa. O conhecimento dos parâmetros de usinagem combinado com a rugosidade é muito

importante para encontrarmos a melhor alternativa de usinagem.

2.1 USINAGEM

A usinabilidade é um quesito muito importante ao analisar-se a aplicação de qualquer material. A influência exercida por este fator é de extrema importância e segue como critério de escolha por um ou outro material em relação à sua aplicação. A usinagem é o processo realizado para alterar a forma geométrica de uma peça com a utilização de uma ferramenta de corte cujo objetivo destina-se na remoção de material por cisalhamento. Neste, ocorre a formação de cavaco, e a cada etapa uma nova superfície é exposta. Para que o corte do material aconteça é necessário que ocorra a interação entre ferramenta e o material, então temos dois movimentos, movimento de corte e o movimento de avanço para reposicionar a ferramenta após cada ciclo (Groover, 2014).

Segundo Diniz (2008), a velocidade de corte resulta do movimento circular da peça em torno da ferramenta, e a velocidade de avanço é dada pelo deslocamento da ferramenta com o objetivo de reposiciona-la e manter o corte. A velocidade de corte é calculada de acordo com a equação 1:

$$v_c = \pi * d * n / 1000 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

v_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro (mm)

n = número de rotações por minuto (rpm).

A velocidade de avanço em operações de torneamento, é o resultado do deslocamento por rotação, que é o caminho de deslocamento transversal em cada volta ou em cada curso

da ferramenta, esta é dada por (Diniz, 2008) conforme mostrado na equação 2.

$$Vf = f * n = 1000 * vc / \pi * d \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

f = avanço (mm/volta),

Vf = velocidade de avanço (m/min)

Os fatores determinantes são o tipo de ferramenta utilizada que tem papel imprescindível nas definições sobre o fluido refrigerante, profundidade de corte e avanço, sempre referenciado pelo dimensionamento da peça a ser trabalhada (Groover, 2016).

2.2 USINABILIDADE

A usinabilidade é compreendida como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seus efeitos sobre grandezas mensuráveis pertencentes ao processo, tais como vida útil da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços de corte e temperatura de corte. É possível que haja materiais que tenham uma boa usinabilidade considerando uma das propriedades de usinagem, como por exemplo a vida útil da ferramenta, porém, sem êxito quando analisada outras propriedades, tais como o acabamento da superfície (Diniz, 2008).

Na maioria das vezes esse objetivo não é tão fácil de ser alcançado e vários problemas ocorrem porque muitas variáveis do processo produtivo são ainda desconhecidas ou pouco exploradas. Dentre elas se destacam as características e usinabilidade do material da peça, seleção correta do material da ferramenta e os parâmetros de corte.

Existem vários conceitos para o termo “usinabilidade”, mas o mais aceito em Usinagem é aquele que o define como

sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material (Machado e Da Silva, 2004). Além de quantificar a facilidade ou dificuldade de se usinar um certo material, a usinabilidade é também usada para quantificar o desempenho 5 das ferramentas de corte e geometria das ferramentas, principalmente em termos de vida de ferramenta, como também a performance de fluidos de corte durante as operações de usinagem.

As características de usinabilidade estão muito relacionadas ao processo de fabricação dos aços, o que implica na possibilidade de ocorrer variações de desempenho na usinagem de lotes diferentes de um mesmo material (Santos e Sales, 2007).

Toda a complexidade relacionada à usinabilidade dos aços não impede que sejam feitas considerações sobre os principais fatores que influenciam a sua usinabilidade. As principais propriedades que afetam a usinabilidade dos aços são: dureza; limite de resistência e ductilidade e essas propriedades são controladas pela composição química e microestrutura do material.

Via de regra, segundo Santos e Sales (2007), as vidas das ferramentas de corte na usinagem dos aços liga são inferiores quando comparadas à usinagem de aços-carbono com porcentagem de carbono equivalentes. O aumento da porcentagem dos elementos de liga promove o aumento da diferença de usinabilidade em relação aos aços carbono com o mesmo teor de carbono.

Segundo Gomes (1977) e Tessler (1993), a usinabilidade não é uma propriedade intrínseca do material, mas, sim, um resultado da interação do metal com a operação de usinagem. As condições de usinagem são estabelecidas para cada tipo de material, operação e ferramenta. O avanço e a velocidade são limitados pelo calor gerado pelos atritos e pela deformação plástica do cavaco e também pela potência e rigidez da máquina. Quanto maior a usinabilidade do material da peça e a resistência ao desgaste do material da ferramenta, maiores podem ser os avanços e as velocidades de corte. Deve-se levar em consideração os fluidos de corte que têm

ação lubrificante e refrigerante. A profundidade de corte é um fator que limita o avanço e a velocidade de corte. Em operações de acabamento, ao invés das de operações desgaste, utilizam-se avanços menores e velocidades maiores para atender as especificações de rugosidade superficial e a precisão das dimensões. Em qualquer trabalho de usinagem, a produtividade depende dos avanços e velocidades de corte; entretanto as condições mais econômicas de usinagem dependem também de outros fatores como tempo e custos de preparação e colocação das ferramentas nas máquinas.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Os tratamentos térmicos mencionados são um conjunto de operações que envolvem aquecimento e resfriamento subsequente, dentro de condições controladas de temperatura, tempo à temperatura, ambiente de aquecimento e velocidade de resfriamento (Chiaverini, 1986). Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são: remoção de tensões internas, aumento ou diminuição da dureza, aumento da resistência mecânica, melhora da ductilidade, melhora da usinabilidade, melhora da resistência ao desgaste dentre outros.

O tratamento térmico de têmpera é o tratamento mais importante dos aços, principalmente os que são usados em construção mecânica. As condições de aquecimento são muito idênticas às que ocorrem no recozimento ou normalização. O resfriamento, entretanto, é muito rápido, para os que se empregam geralmente meios líquidos, onde as peças são mergulhadas depois de aquecidas convenientemente (Chiaverini, 1986). Deste processo resultam modificações muito intensas que levam a um grande aumento da dureza, da resistência ao desgaste, da resistência a tração, ao mesmo tempo em que as propriedades relacionadas com a ductilidade sofrem uma razoável diminuição e tensões internas são originadas em grande intensidade (Chiaverini, 1986).

O tratamento térmico de revenimento é aplicado nos aços temperados, imediatamente após a têmpera, a

temperaturas inferiores à da zona crítica, resultando em modificação da estrutura obtida na têmpera. A alteração estrutural que se verifica no aço temperado em consequência do revenido melhora a ductilidade, reduzindo os valores de dureza e resistência à tração, ao mesmo tempo em que as tensões internas são aliviadas (Pereira, 1972).

As propriedades mecânicas do aço tratado dependem da temperatura de revenimento. Dependendo da temperatura em que se processa o revenido, a modificação estrutural é tão intensa que determinados aços adquirem as melhores condições de usinabilidade. Os tratamentos de têmpera e revenido estão sempre associados (Chiaverini, 1986).

2.4 RUGOSIDADE

A rugosidade refere-se a marcas provocadas pela ferramenta que opera sobre a superfície da peça. A textura da peça pode ser dividida em rugosidade e ondulação. Pode-se afirmar que a ondulação ou textura secundária é uma coleção de irregularidades repetitivas de ondas de comprimento bem superior que sua amplitude, surgida por inexatidões de movimentos nos equipamentos. Essas ondulações podem ser causadas por vibrações provenientes da máquina ferramenta no processo da usinagem. Os sulcos produzidos pela ferramenta podem ser verificados por diferentes parâmetros de rugosidade. Já a rugosidade é um fenômeno de período curto, provocado pelo avanço da ferramenta, defeitos da ferramenta e fenômenos durante a remoção do cavaco (Novaski, 1994). 7

Os parâmetros de rugosidade estão compreendidos nos parâmetros de amplitude (pico e vale) e altura máxima do pico do perfil, profundidade máxima do vale do perfil e altura máxima do perfil. Entre os parâmetros de rugosidade, pode-se destacar um quanto a média do desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a) e desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q) (Novaski, 2013).

Para que se obtenha um acabamento preciso no processo de usinagem verifica-se proporcionalmente a

ferramenta de corte e as propriedades da peça, para a definição dos parâmetros e do fluido de corte (Bralha, 1988).

A maioria dos instrumentos de medição de rugosidade baseiam-se no princípio da identificação das imperfeições pelo deslocamento do apalpador sobre a superfície a uma certa velocidade e distância de análise. Um sinal elétrico é obtido, amplificado e processado para produzir uma identificação da textura superficial (Dagnall, 1998)

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O procedimento adotado neste Trabalho de Conclusão de Curso consistiu basicamente na variação dos parâmetros de corte e usinagem em torno CNC (Controle Numérico Computadorizado) do aço SAE 1045 temperado e revenido e finalmente na determinação e análise das rugosidades produzidas.

3.1 CORPOS DE PROVA E TRATAMENTOS TÉRMICOS

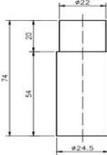
Os corpos de prova foram tratados termicamente nas instalações da Diamante Geração de Energia LTDA em Capivari de Baixo – SC, eles foram usinados nas dimensões mostradas na Figura 1(a). Os tratamentos térmicos foram realizados em forno mufla. Na têmpera, normalização e recozimento as amostras foram aquecidas a 800°C com um tempo de encharque de 45 minutos e resfriadas em óleo. Em seguida os corpos de prova foram revenidos a uma temperatura de 560 °C durante 45 minutos e na sequência resfriados ao ar.

O aço SAE 1045 possui composição química de Carbono (0,43% - 0,50%), Silício (0,15% - 0,35%), Manganês (0,30% - 0,60%), Fósforo (0,03% máx.) e Enxofre (0,05% máx.)

Os 27 corpos de prova foram desbastados no diâmetro de 24,5mm por 50mm de comprimento para a remoção da carepa produzida na etapa de tratamento térmico, e devido as limitações da máquina utilizada, que possuía uma placa

pequena, foi necessário fazer um rebaixo de 22mm de diâmetro por 20mm de comprimento para eliminar a vibração na usinagem e proporcionar condição de testes para o experimento. Figura 01 (b).

Figura 1 – (a) Desenho dos corpos de prova-unidade mm. (b) Peça rebaixada.



Fonte: Do Autor.

3.2 USINAGEM DOS CORPOS E PROVA E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM

Os parâmetros de usinagem utilizados nesta pesquisa são a velocidade de corte (m/min), avanço transversal (mm) e profundidade de corte (mm), foram selecionados três valores para cada parâmetro. Com a determinação da velocidade de corte e o diâmetro da peça foi possível calcular a rotação da máquina para cada amostra conforme a Equação 1.

A Tabela 1 mostra os parâmetros de usinagem utilizados nesta pesquisa.

A dureza das amostras na condição fornecida e nas demais condições estudadas foi determinada em durômetro de bancada Mitutoyo Modelo DUROTWIN – DT 20. A dureza foi realizada na escala Rockwell C tendo como penetrador um cone de diamante, pré carga de 98,7N (10 kg) e carga de 1471N (150 kg).

A usinagem dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Engenharia Mecânica da Faculdade FUCAP de Capivari de Baixo, SC, sendo utilizado um torno CNC da marca Siemens, modelo Ômega 300, ferramenta intercambiável com inserto de metal duro revestido (DCMT 11T 304-MS) de fabricação da Mitsubishi Materials com raio de 0,4 mm na ponta.

A análise estatística desta pesquisa se deu por meio da avaliação da influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade (R_a), utilizando para isso a ferramenta de análise de dados denominada ANOVA, que verifica a variância dos dados de entrada referente as variáveis em questão com 95% de significância.

Figura 2: Torno CNC Ômega 300



Fonte: Do autor.

Tabela 1 – Parâmetros de usinagem utilizados

Identificação	VC (m/min)	RPM	f (mm)	Ap (mm)	ciclo (s)
1	70	909,4286	0,05	0,5	36,94628
2	70	909,4286	0,05	0,75	36,94628
3	70	909,4286	0,05	1	36,94628
4	70	909,4286	0,075	0,5	24,63085
5	70	909,4286	0,075	0,75	24,63085
6	70	909,4286	0,075	1	24,63085
7	70	909,4286	0,1	0,5	18,47314
8	70	909,4286	0,1	0,75	18,47314
9	70	909,4286	0,1	1	18,47314
10	100	1299,184	0,05	0,5	25,86239
11	100	1299,184	0,05	0,75	25,86239
12	100	1299,184	0,05	1	25,86239
13	100	1299,184	0,075	0,5	17,2416
14	100	1299,184	0,075	0,75	17,2416
15	100	1299,184	0,075	1	17,2416
16	100	1299,184	0,1	0,5	12,9312
17	100	1299,184	0,1	0,75	12,9312
18	100	1299,184	0,1	1	12,9312
19	130	1688,939	0,05	0,5	19,89415
20	130	1688,939	0,05	0,75	19,89415
21	130	1688,939	0,05	1	19,89415
22	130	1688,939	0,075	0,5	13,26277
23	130	1688,939	0,075	0,75	13,26277

24	130	1688,939	0,075	1	13,26277
25	130	1688,939	0,1	0,5	9,947075
26	130	1688,939	0,1	0,75	9,947075
27	130	1688,939	0,1	1	9,947075

Fonte: Do Autor, 2020.

Foi realizada a preparação do torno CNC com a montagem do suporte intercambiável, conforme figura 3 (a), e feito a programação manual com os comandos para usinagem dos corpos de prova de acordo com os parâmetros estabelecidos, conforme figura 3 (b).

Figura 3 – (a) Ferramenta intercambiável. (b) Programação CNC



Fonte: Do Autor.

3.3 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Para avaliação da usinabilidade baseada no acabamento superficial utilizou-se o parâmetro de rugosidade R_a (μm). Após procedimentos de usinagem (torneamento) as medições de rugosidade foram determinadas por um rugosímetro digital Modelo TR 200 Roughness Tester Fabricante Time Group utilizou-se um comprimento de amostragem (cut off) de 0,8 mm como base para aquisição de dados.

Em todos os diâmetros resultantes do processo de usinagem, realizaram-se três medições de rugosidade em 5 (cinco) regiões distintas dos corpos de prova, com o intuito de tornar os resultados mais confiáveis, após as leituras calculou-se a média aritmética das rugosidades (R_a) encontradas e o desvio padrão, e após foi feita a análise de variância ANOVA.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo apresentaremos os resultados e análises das amostras usinadas, ainda serão abordados individualmente a análise estatística (ANOVA) e a influência sobre a rugosidade.

4.1 ANÁLISE DE VARIÂNCIA NA RUGOSIDADE MEDIDA

Com a utilização de análise de variância (ANOVA) foi possível avaliar individualmente a influência de cada parâmetro para as três faixas de variação dos demais parâmetros utilizados no experimento. Foram realizadas quinze leituras de rugosidade para cada amostra do experimento, calculada a média aritmética dos valores encontrados (X), o desvio padrão (σ) e o intervalo de confiança (IC) com significância de 95% conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do experimento

Identificação	Média X (μm)	Desvio Padrão (σ)
1	1,64	0,13435
2	1,56	0,10607
3	1,57	0,7778
4	2,17	0,16971
5	2,59	0,09899
6	1,54	0,45255
7	1,91	0,02828
8	2,13	0,06364
9	1,55	0,09192
10	1,52	0,01414
11	1,27	0,16971
12	1,46	0,09192
13	1,39	0,00707
14	1,47	0,056587
15	1,61	0,24042
16	1,84	0,43134
17	2,00	0,08485
18	2,29	0,12021
19	0,84	0,10607
20	1,47	0,07071
21	1,45	0,02121
22	1,38	0,2192
23	1,98	0,06364

24	2,06	0,09899
25	1,45	0,05657
26	2,43	0,01414
27	2,44	0,09899

Fonte: Do Autor.

4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO AVANÇO (f)

Foi observado que para a profundidade de corte fixa de 0,5mm e trabalhado nas três faixas de velocidade de corte não houve influência significativa do avanço (f) sobre os resultados de rugosidade (p-valor = 0,1319), para profundidade de 0,75mm (p-valor 0,0735) não houve influência significativa e por fim para profundidade fixa de 1mm (p-valor 0,1479) também não houve influência do avanço sobre o parâmetro estudado conforme mostrado nas Tabelas 03, 04 e 05. Para esta análise pontual verificou-se comportamento similar com as alterações de avanço (f), não sendo verificadas variações consideráveis para a rugosidade.

Tabela 3 – Profundidade de corte fixa ($A_p = 0,5\text{mm}$)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	0,27335556	2	0,136678	3,506556	0,131917	6,944272
Veloc. corte	0,77108889	2	0,385544	9,891391	0,028288	6,944272
Erro	0,15591111	4	0,038978			
Total	1,20035556	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 4 – Profundidade de corte fixa ($A_p = 0,75\text{mm}$)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	0,96720089	2	0,4836	5,379089	0,073461	6,944272
Veloc. corte	0,39501422	2	0,197507	2,196872	0,227095	6,944272
Erro	0,35961511	4	0,089904			
Total	1,72183022	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 5 – Profundidade de corte fixa ($A_p = 1\text{mm}$)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	0,5657556	2	0,282878	3,200779	0,147885	6,944272
Veloc. corte	0,2861556	2	0,143078	1,618934	0,305421	6,944272
Erro	0,3535111	4	0,088378			
Total	1,2054222	8				

Fonte: Do Autor.

Ficou evidente que, quando fixado o parâmetro de velocidade de corte em 70 m/mim e analisado a influência do avanço nas três faixas de profundidade de corte obteve-se na análise de dados (p-valor 0,1761), portanto, não houve diferença significativa nos resultados, conforme Tabela 6, porém para velocidade de corte de 100 m/min (p-valor 0,0074) e para velocidade de 130 m/min (p-valor 0,0062) houve influência do avanço sobre os resultados de rugosidade conforme Tabelas 7 e 8.

Tabela 6 – Velocidade de corte fixa (70m/min)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	0,390822222	2	0,195411	2,766121	0,176088	6,944272
Veloc. corte	0,451288889	2	0,225644	3,194086	0,148266	6,944272
Erro	0,282577778	4	0,070644			
Total	1,124688889	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 7 – Velocidade de corte fixa (100m/min)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	0,75315556	2	0,376578	21,30233	0,007367	6,944272
Veloc. corte	0,10055556	2	0,050278	2,844123	0,170463	6,944272
Erro	0,07071111	4	0,017678			
Total	0,92442222	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 8 – Velocidade de corte fixa (130m/min).

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Avanço	1,090156	2	0,545078	23,41623	0,006192	6,944272
Veloc. corte	1,243756	2	0,621878	26,71551	0,004851	6,944272
Erro	0,093111	4	0,023278			
Total	2,427022	8				

Fonte: Do Autor.

Realizada a análise de dados e identificado que houve influência nos resultados para a faixa de 100m/min, referentes a velocidade de corte, foi estipulado através do teste de TUKEY conforme equação 3, diferença mínima significativa (dms) de 0,54 para comparação dos resultados médios dos testes de rugosidade em função do avanço e identificada diferença de 0,55 e 0,66 para as faixas 0,075mm-0,1mm e 0,05mm-0,1mm, representando um aumento nos valores médios de rugosidade de 36,9% e 47,8% respectivamente conforme Tabela 9.

$$dms = q \cdot \sqrt{QMR n} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

dms = diferença mínima significativa

q = amplitude estudentizada (tabelado)

QMR = MQ (tabela ANOVA)

n = número de repetições

Tabela 9 – Diferença entre grupos de resultados para avanço com Vc = 100 m/min.

avanço (mm)	média 1	média 2	módulo da média
0,05 - 0,075	1,38	1,486667	0,106666667
0,05 - 0,1	1,38	2,04	0,66
0,075 - 0,1	1,486667	2,04	0,553333333

Fonte: Do Autor.

Para faixa de 130 m/min de velocidade de corte (p-valor 0,0062) a diferença mínima significativa estipulada no teste de TUKEY foi de 0,62 para comparação dos resultados médios,

sendo identificada diferença para faixa 0,05mm – 0,1mm o valor de 0,84, representando um aumento de 67,2% no valor médio da rugosidade conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Diferença entre grupos de resultados para avanço com Vc = 130 m/min.

avanço (mm)	média 1	média 2	módulo da média
0,05 - 0,075	1,25	1,81	0,56
0,05 - 0,1	1,25	2,086667	0,83666667
0,075 - 0,1	1,81	2,086667	0,27666667

Fonte: Do Autor.

4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DE CORTE (AP)

Foi observado que para a velocidade de corte fixa de 70 m/min e posteriormente em 100 m/min e trabalhado nas três faixas de avanço não houve influência significativa da profundidade de corte (Ap) sobre os resultados de rugosidade (p-valor = 0,1483) conforme Tabela 6 e (pvalor 0,1705) conforme Tabela 7. Porém houve influência significativa da profundidade de corte na faixa de velocidade de corte fixa de 130 m/min (p-valor 0,0049) conforme Tabela 8. A diferença mínima significativa estipulada no teste de TUKEY foi de 0,62 para comparação dos resultados médios, sendo identificada a diferença para faixa 0,5mm – 0,75mm, o valor de 0,78 e para faixa de 0,5mm-1mm o valor de 0,8, representando um aumento de 65,5% e 67,2% no valor médio da rugosidade conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Diferença entre grupos de resultados para Ap com Vc = 130 m/min

Profundidade de Corte (mm)	Média 1	Média 2	Módulo da Média
0,5 - 0,75	1,19	1,966667	0,77666667
0,5 - 1	1,19	1,99	0,8
0,75 - 1	1,966667	1,99	0,02333333

Fonte: Do Autor.

O parâmetro de profundidade de corte trabalhado nas três faixas de velocidade de corte com avanço fixo não apresentou influência significativa em nenhum dos três testes,

apresentando valores para p-valor da análise de dados maiores que 5% referente a significância do experimento, conforme Tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12 – Avanço fixo (0,05mm)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Veloc. corte	0,1766	2	0,0883	1,549576	0,317473	6,944272
Profund. corte	0,059267	2	0,029633	0,520035	0,629864	6,944272
Erro	0,227933	4	0,056983			
Total	0,4638	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 13 – Avanço fixo (0,075mm).

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Veloc. corte	0,564822	2	0,282411	1,775674	0,280589	6,944272
Profund. corte	0,224689	2	0,112344	0,706371	0,546116	6,944272
Erro	0,636178	4	0,159044			
Total	1,425689	8				

Fonte: Do Autor.

Tabela 14 – Avanço fixo (0,1mm).

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Veloc. corte	0,083267	2	0,041633	0,26223	0,781604	6,944272
Profund. corte	0,458867	2	0,229433	1,445098	0,337021	6,944272
Erro	0,635067	4	0,158767			
Total	1,1772	8				

Fonte: Do Autor.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE (VC)

Conforme as Tabelas 12, 13 e 14, referente à análise da influência da velocidade de corte trabalhada nas três faixas de profundidade de corte com avanço fixo foi verificado nos três testes que não houve influência nos resultados médios de rugosidade, fato verificado pelos valores assumidos para p-

valor na análise de dados maiores que 5% referente a significância do experimento.

A análise apresentou resultados insignificantes quando verificada a influência da velocidade de corte trabalhada nas três faixas de avanço para profundidade de corte fixa em 0,75mm (p-valor 0,228) tabela 4 e 0,1mm (p-valor 0,305) tabela 5, porém mostrou influência significativa da velocidade de corte para profundidade fixa de 0,5mm (p-valor 0,0283) Tabela 3.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Este capítulo apresenta a análise estatística dos resultados deste trabalho. Foi utilizado como referência para análise dos resultados de rugosidade a classe de rugosidade N7 que delimita as operações de acabamento liso e polido conforme Tabela 15 estabelecida pela norma ABNT NBR ISO 4288, conforme determinado na proposta deste trabalho.

Tabela 15 – Classe de rugosidades (Ra - μm)

Classe de rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Rugosidade máxima em Ra (μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025

Fonte: Do Autor.

4.5.1 Quanto aos parâmetros utilizados

De forma geral, a manipulação dos parâmetros de corte proporcionou uma redução significativa para os resultados de rugosidade, variando de 2,59 μm para 0,84 μm , representando queda de 67,5%.

De acordo com a recomendação expressada na Tabela 15, para rugosidades que variam entre 0,81 e 1,6, para acabamentos lisos, dos 27 corpos de prova testados, 15 atenderam a recomendação para a classe, representando 55,6% do total avaliado.

O avanço mínimo utilizado de 0,05mm foi predominante nos resultados que atenderam a especificação da rugosidade estando presente em 8 dos 15 conjuntos de parâmetros, caracterizando 53,3% das amostras. O avanço médio de 0,075mm esteve em 5 e o avanço de 0,1mm em 2 dos resultados.

Referente a profundidade de corte, os três valores selecionados apareceram entre as 15 amostras aprovadas de forma similar, sendo de maior notoriedade a profundidade máxima, de 1mm, presente em 6 dos 15 conjuntos de parâmetros, representando 40% do total. A profundidade de corte de 0,5mm esteve em 5 conjuntos (33,3%) e a profundidade média em 4 conjuntos de parâmetros (26,7%).

Para a velocidade de corte, as faixas com valores maiores (100 m/min e 130 m/min) apareceram com maior frequência entre as amostras que atenderam a especificação, tendo uma representatividade de 40% e 33,3% respectivamente.

4.5.2 Quanto ao tempo de ciclo de usinagem

Para os testes que atenderam a especificação de rugosidade o tempo de ciclo de usinagem variou de 10 a 37 segundos conforme o conjunto de parâmetro utilizado. Essa variação representa 73% de diminuição no tempo de usinagem e implica na utilização de maiores velocidades de corte para a obtenção.

4.5.3 Análise da repetibilidade do experimento

Para análise de repetibilidade do experimento foram usinados 3 corpos de prova com os parâmetros da melhor condição alcançada (condição 19 – Tabela 2) e 3 três corpos de prova selecionando uma condição aleatória do experimento (condição 11 – Tabela 2). Para esta análise foram gerados os resultados conforme Tabela 16.

Tabela 16 – Repetibilidade do experimento

Amostras	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	S	X
melhor condição - 19 (0,84µm)							
1	0,82	0,77	0,82	0,85	0,77	0,03507	0,72
2	0,62	0,79	0,7	0,61	0,68	0,07246	
3	0,67	0,64	0,77	0,67	0,72	0,05128	
condição aleatória - 11 (1,27µm)							
1	1,37	1,37	1,28	1,25	1,01	0,14758	1,28
2	1,25	1,18	1,18	1,27	1,28	0,04868	
3	1,83	1,6	1,41	1,86	1,45	0,20893	

Fonte: Do Autor.

4.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DUREZA DO MATERIAL

Para a avaliação da influência da dureza do material nos resultados de rugosidade foram realizadas a usinagem de 2 corpos de prova na condição fornecida (aço SAE 1045), utilizando os parâmetros da amostra 19, referente a melhor condição de usinagem e 2 corpos de prova na condição temperado com os mesmos parâmetros de corte. Os resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Influência da dureza do material

Amostras	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Leitura 5	S	X
condição aço fornecido							
1	1,82	1,74	2,19	2,12	1,99	0,191494	1,975
2	1,57	2,03	1,93	1,96	2,03	0,191781	
condição aço temperado							
1	0,81	0,64	0,68	0,64	0,66	0,071274	0,71
2	0,97	0,76	0,76	0,71	0,71	0,108028	

Fonte: Do Autor.

Após comparado os resultados obtidos com os valores referente a usinagem do aço SAE 1045 temperado e revenido constatou-se uma variação expressiva no aumento da rugosidade para a usinagem do aço SAE 1045 na condição

fornecida (235%), material com menor dureza, e uma diminuição razoável na usinagem do aço SAE 1045 temperado (15,5%) sugerindo influência para os resultados.

5 CONCLUSÕES

Com base na análise de resultados encontrados neste trabalho pode-se afirmar que todos os parâmetros tiveram influência significativa sobre a rugosidade do aço SAE 145 temperado e revenido.

O parâmetro avanço (f) apresentou influência significativa alterando os valores médios de rugosidade em 67,2% em sua avaliação individual, com variação em todas as faixas avaliadas, denotando maior influência quando adotado valores superiores para o parâmetro.

A influência da profundidade de corte (Ap) nos resultados de rugosidade se mostrou muito expressiva, alterando valores na mesma margem percentual relacionada ao avanço (67,2%), superando os valores relacionados a velocidade de corte (60%). A melhor condição de usinagem, caracterizada pelo menor valor de rugosidade foi alcançada utilizando o valor máximo de velocidade de corte (130 m/min) e valores mínimos para avanço (0,05mm) e profundidade de corte (0,5mm), verificados na amostra 19 da Tabela 2.

Verificou-se que, para o grupo de amostras que atenderam a especificação para rugosidade, variando dentro da classe N7, com range entre 0,81 μ m e 1,6 μ m, o tempo de ciclo da usinagem oscilou entre 10s e 37s, permitindo concluir ser possível alcançar bons níveis de rugosidade em tempos menores com a seleção adequada de parâmetros.

Quando comparada a pior e a melhor condição para usinagem, por meio dos resultados obtidos, verificou-se uma diminuição de 68% para os níveis de rugosidade, valor significativo para as amostras, e uma diminuição de 19% no tempo de ciclo de usinagem, valor relativamente baixos, considerando o range total observado no experimento.

Considerando o intervalo de confiança calculado para cada amostra pode-se afirmar que houve repetibilidade nos

resultados para o teste específico, no qual foram utilizados os parâmetros da melhor condição de usinagem (Tabela – condição 19) e os parâmetros de uma condição aleatória (Tabela 2 – condição 11).

Ficou evidenciado que há influência da dureza do material nos resultados de rugosidade, sendo verificado, na comparação entre a usinagem do aço SAE 1045 temperado e revenido e aço SAE 1045 fornecido, um aumento substancial de 235% para o valor médio de rugosidade e quando comparado resultados entre aço SAE 1045 temperado e revenido e aço SAE 1045 temperado houve uma diminuição de 15,5% para os valores do parâmetro em análise. 20

REFERÊNCIAS

BRALLA, J. G. **Handbook of product design for manufacturing: a practical guide to lowcost production**. 2. ed. New York, McGraw- Hill, 1988.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica**, 2. ed. 1986.

DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 3. ed. England, Taylor Hobson Limited, 1998.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

GOMES, M. R., FILHO, E. B. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos alumínio, chumbo, cobre, estanho e zinco**. São Paulo: ABM, 1977.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

PEREIRA, R. L. **Curso de tratamento térmico dos metais**. 2. ed. São Carlos, 1972.

SANTOS; S. C. e SALES, W. F., “**Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**”, São Paulo: Artliber, 2007.

TESSLER, M. B., BARBOSA, C. A. A usinabilidade dos aços inoxidáveis. **Metalurgia e Materiais - ABM**, v. 49, n. 413, p. 32-41, janeiro de 1993.

ANÁLISE DE VIDA EM FADIGA DE UM EIXO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS E O MÉTODO TENSÃO-VIDA

Edson Pereira Junior¹

Derek Manoel Luup Carvalho²

Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Resumo: Os crescentes avanços de recursos computacionais das áreas de engenharia auxiliam e facilitam o desenvolvimento de componentes mecânicos e até mesmo de equipamentos completos, esses recursos computacionais permitem a realização de estudos de movimento, estudos de colisão, simulações de falhas entre outras possibilidades. Esses recursos permitem, também, que empresas usem destes estudos e simulações para obter agilidade, ganhos de tempo e de confiabilidade de projetos e assim resultando em maior competitividade demercado. Este trabalho mostrará um estudo de vida em fadiga de um eixo vazado que conta com rasgo de chaveta interna, uma área de geometria cônica e um corte transversal, este estudo será realizado via simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) usando o *software SolidWorks Simulation®*. Para a realização da simulação, serão encontradas asforças atuantes sobre o eixo, as forças de resistência a fadiga do aço SAE 1045 trefilado para cada número de ciclos para montar um diagrama S-N adequado e as equações necessárias para montar uma simulação utilizando-se a tensão equivalente de von Mises e a parábola de Gerber para correção da tensão média. O objetivo desta análise será determinar se o eixo do estudo é adequado para alcançar a vida infinita, pois, o mesmo não foi dimensionado em sua concepção.

Palavras-chave: Fadiga. Elementos finitos. Método tensão-

¹ E-mail: edson-contato@outlook.com.

² E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

vida. Von Mises. Gerber.

1 INTRODUÇÃO

Nas áreas de engenharia há uma constante evolução, hoje o que se define como inovador, em pouco tempo poderá ser considerado obsoleto. Com essas evoluções surgem novas tecnologias e o aprimoramento de tecnologias já existentes para que estas atendam o mercado da melhor forma possível.

Alguns desses avanços são importantes para os setores de engenharia e projetos mecânicos, pois, podem facilitar o trabalho de concepção de componentes e equipamentos mecânicos, através destes avanços as empresas podem somar um ganho de tempo e confiabilidade desde que as ferramentas sejam usadas de forma correta e por pessoa capacitada.

Uma dessas ferramentas muito comum nas variadas áreas de engenharia é o Método de Elementos Finitos (MEF), que é um método matemático que está disponível em alguns softwares de engenharia como o *SolidWorks*. Este método pode ser usado para a realização de simulações e assim diminuir o tempo de projeto de componentes mecânicos complexos que poderiam consumir uma grande quantidade de horas de engenheiros e projetistas.

Para o estudo de vida em fadiga de um eixo, deve-se realizar os cálculos para a concepção do diagrama S-N somados aos métodos adequados e utilizando valores encontrados em tabelas referentes a geometria do componente a ser estudado. Para este estudo foi adotado a realização por simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) usando o software *SolidWorks Simulation*®.

O eixo a ser analisado é fabricado em aço SAE 1045 trefilado e se movimenta em sentido horário e anti-horário, movimentando um conjunto mecânico com massa, aceleração e velocidade consideráveis, o eixo possui áreas de concentrações de tensões e devido a isto existe a possibilidade de surgirem uma ou mais trincas que possam fazer com que o

componente falhe por fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

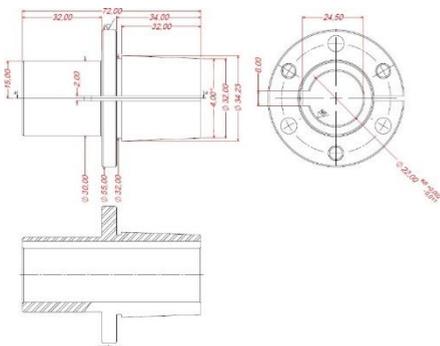
A revisão bibliográfica abordada neste Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo apresentar métodos numéricos e computacionais que permitam um fácil entendimento para que sejam realizadas simulações computacionais no desenvolvimento e validação de componentes mecânicos onde haja dificuldade ou até mesmo não seja possível o dimensionamento correto do mesmo independente do motivo.

2.1 EIXO VAZADO

A peça a ser analisada pelo MEF no *software Solidworks* será um eixo vazado que conta com rasgo de chaveta interna, uma área de geometria cônica e um corte transversal. Este componente deve ser engastado ao eixo do redutor planetário devido à força exercida do aperto da polia sobre o componente, como mostra a Figura 1. Esta mesma peça é utilizada como peça padrão em outros equipamentos semelhantes produzidos pela Andriani Industrial, porém, sempre atuando com a mesma função.

Em trabalho, os eixos podem ser submetidos a esforços de flexão, tração, compressão ou torção, que podem atuar isoladamente ou de maneira combinada. (RAOTOLE; SADAPHALE; CHAUDHARI, 2013).

Figura 1- Desenho técnico do eixo objeto de estudo com medidas em milímetros.



Fonte: Andriani Industrial, 2020.

Notam-se várias regiões com mudança de geometria que podem atuar como concentradores de tensão. A peça é fabricada em aço SAE-1045 (Andriani Industrial, 2020).

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo Matthew N. O. Shadiku (2004), o MEF é um método numérico usado para calcular resistências e características comportamentais de um corpo. Inicialmente o MEF foi aplicado na análise de problemas da mecânica dos sólidos, porém, atualmente também é muito utilizado na análise de outros fenômenos físicos. O método consiste em dividir um corpo complexo a ser estudado em pequenas partes ligadas por nós e assim o *software* pode calcular e resolver as equações diferenciais que representam o corpo de modo que consiga realizar simulações com resultados globais corretos, desde que o modelo e os dados de entrada da simulação estejam de acordo com a realidade.

Ainda segundo Matthew N. O. Shadiku (2004), o MEF tem sua origem no campo de análises de estruturas e passou a ser aplicado a problemas de eletromagnetismo a partir de 1968, porém, é possível rastrear estudos feitos na década de 1940, onde a necessidade de resolver problemas complexos envolvendo elasticidade e análise estrutural, engenharia civil,

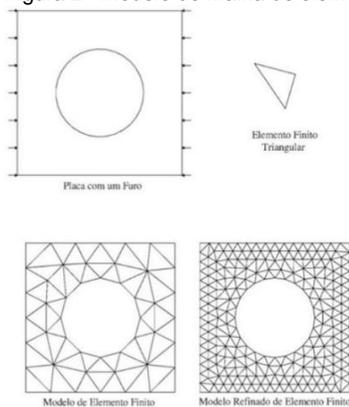
eaeroespacial. Podem-se citar como pioneiros A. Hrennikoff que usava uma analogia de rede em seus estudos, e R. Courant que usava uma analogia de dividir o domínio em sub-regiões triangulares finitas para resolver equações diferenciais parciais elípticas de segunda ordem.

Segundo Fish e Belytschoko (2009), muitos problemas da engenharia podem ser descritos por meio de equações diferenciais cuja solução utilizando métodos analíticos pode ser inviável quando envolve geometrias arbitrárias do cotidiano da engenharia. O método de elementos finitos (MEF) é uma aproximação numérica com a qual essas equações diferenciais podem ser resolvidas de modo aproximado.

O uso de ferramentas computacionais de análise durante o projeto diminui os custos e o tempo de desenvolvimento do produto, permitindo inclusive que os projetistas avaliem os efeitos de diversos parâmetros, como mudança de geometria e escolha de material, sem a necessidade da construção de protótipos físicos (PUCHI-CABRERA et al., 2008).

Segundo Fish e Belytschoko (2009), O MEF consiste em dividir o corpo a ser estudado em elementos finitos (Figura 2) conectados por nós que juntos formam um conjunto de elementos que por sua vez é chamado de malha de elementos finitos.

Figura 2 - Modelo de malha de elementos finitos



Fonte: FISH, BELYTSCHKO, 2009.

Os componentes mecânicos na forma de barras simples, vigas, podem ser analisados de forma relativamente fácil utilizando métodos básicos de mecânica que fornecem soluções analíticas. Componentes reais, entretanto, raramente são tão simples, e o desenhista se vê forçado a adotar aproximações menos eficazes de soluções analíticas, experimentação ou métodos numéricos. Existe uma grande variedade de técnicas numéricas usadas em aplicações de engenharia para as quais o computador digital é muito útil. Em desenho Mecânico, os *softwares* de CAD (Desenho com Auxílio de Computador) são intensamente empregados, um método que se integra bem com CAD é a *Análise de Elementos Finitos* (FEA, do inglês *Finite Element Analysis*). A teoria matemática e as aplicações do método são variadas. Há uma série de pacotes de *softwares* comerciais disponíveis, por exemplo, ANSYS®, NASTRAN®, Algor(BUDYNAS; NISBETT, 2011).

A análise por elementos finitos de um problema qualquer envolve, basicamente, quatro etapas; (a) discretização do domínio em um número finito de sub-regiões ou elementos, como mostra a Figura 3; (b) obtenção das equações que regem um elemento típico; (c) conexão de todos os elementos no domínio e (d) resolução do sistema de equações obtido (Matthew N. O. Shadiku, 2004).

Figura 3 - Modelo de malha em um virabrequim usando o *software* ANSYS®



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

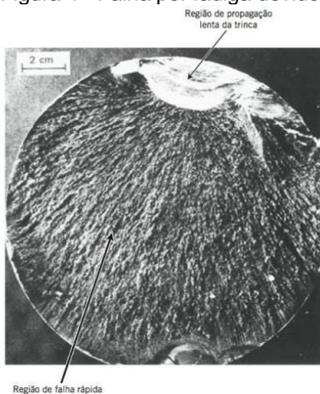
Atualmente há uma grande variedade de softwares de engenharia capazes de realizar simulações matemáticas computacionais, entre eles, talvez o mais reconhecido seja o ANSYS®. Outros *softwares* com a função CAD como o *SolidWorks* tem ferramentas para simulações matemáticas,

porém os softwares criados especificamente são mais confiáveis. Esses cálculos matemáticos seriam, talvez, impossíveis de serem realizadas por uma pessoa, e com o uso desses softwares cabe ao usuário tarefas mais simples como determinar os padrões da geração de malha e as condições de contorno e ao final verificar se os resultados obtidos estão coerentes através de cálculos manuais e se possível através de experimentos.

2.3 FALHA POR FADIGA

Segundo Callister e Rethwisch (2009), as falhas devido à fadiga são causadas por trincas que quase sempre se iniciam na superfície de um componente, geralmente nos pontos de concentrações de tensões. As regiões de nucleação de trincas ocorrem onde há riscos superficiais, ângulos vivos, rasgos de chaveta, fios de rosca e afins, como mostra a Figura 4. O comportamento em fadiga de materiais de engenharia é altamente sensível a diversas variáveis.

Figura 4 - Falha por fadiga devido à propagação de trinca



Fonte: (Callister, Rethwisch, 2012).

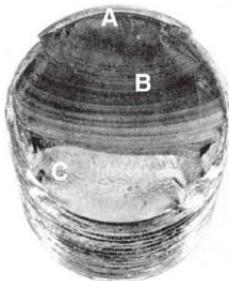
Segundo BUDYNAS e NISBETT (2011), nos ensaios de propriedades mecânicas de materiais onde está relacionado o diagrama tensão-deformação, a carga aplicada no material é

feita de forma gradual, para que assim haja tempo suficiente para a deformação ocorrer no corpo de ensaio.

Falhas por fadiga tem a superfície de fratura plana e perpendicular ao eixo, assim como as falhas por fratura frágil, porém suas características são distintas uma da outra, as falhas por fadiga surgem através de três estágios de desenvolvimento (ver Figura 5):

- Estágio 1 – Início de uma ou mais microtrincas, que se dá através de deformação plástica cíclica seguida da propagação cristalográfica;
- Estágio 2 - As microtrincas aumentam tornando se macrotrincas formando superfícies de fraturas planas paralelas, essas superfícies apresentam bandas ondulares escuras e claras, conhecidas como *marcas de praia* ou *marcas de concha de ostra*;
- Estágio 3 – Ocorre no ciclo de tensão final, neste estágio o material remanescente não suporta as cargas e então ocorre uma fratura rápida e repentina.

Figura 5 - Falha por fadiga em parafuso



Falha por fadiga de um parafuso de porca em razão de flexão unidirecional repetida. A falha começou na raiz da rosca em A, propagou-se ao longo da maior parte da seção transversal como evidenciado pelas marcas de praia em B, antes da fratura rápida final em C.

Fonte: Budynas; Nisbett, 2011.

Segundo Norton (2013), August Wöhler, realizou a primeira investigação científica do que estava sendo chamado de falha por fadiga, ele testava eixos até a falha sob carregamento alternado, seus estudos resultaram na descoberta do número de ciclos de tensão variante no tempo

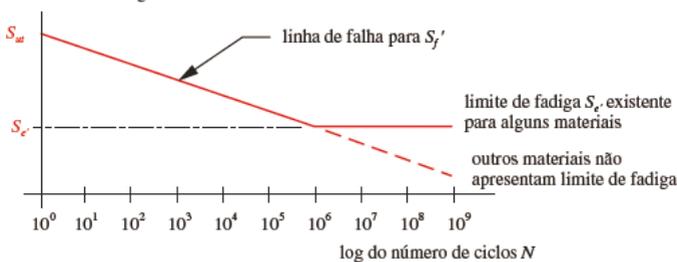
como os causadores da falha por fadiga e com base nisso criou o diagrama S-N ou curva de Wöhler onde no gráfico é representada a quantidade de ciclos por uma escala logarítmica, como mostra a Figura 6.

A taxa de crescimento ou propagação da trinca é muito pequena, da ordem de 10^{-8} até 10^{-4} in por ciclo, mas após um grande número de ciclos torna-se significativo. Se a superfície de ruptura for vista bastante ampliada, as *estrias*, devido a cada ciclo de tensão, podem ser vistas.

Na figura 6 - Diagrama S-N ou curva de Wöhler, onde é representado o log da resistência da peça em função do log do número de ciclos à qual a peça foi submetida (Norton, 2013).

Figura 6 - Diagrama S-N ou curva de Wöhler

log da resistência à fadiga S

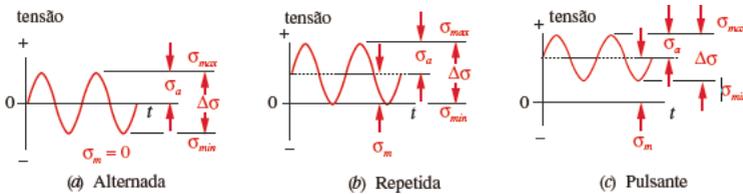


Fonte: Norton, 2013.

Ainda segundo Norton (2013), qualquer carga que varie no tempo pode resultar em uma falha por fadiga. Em máquinas rotativas essas cargas tendem para uma consistência na sua amplitude e a forma da onda tensão-tempo ou deformação-tempo terá a mesma aparência que a onda carga-tempo. Como mostra a Figura 7, as tensões podem variar entre:

- Tensão alternada – O valor médio é igual à zero;
- Tensão repetida – A formação da onda varia de zero a um máximo com valor médio igual a componente alternada;
- Tensão pulsante – Todas as componentes tem valor diferente de zero.

Figura 7 - Ondas de tensões



Fonte: Norton, 2013.

- O intervalo de tensões $\Delta\sigma$ é definido como $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$
- A amplitude da variação de tensão σ_a é obtida de $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
- A tensão média σ_m é obtida de $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

2.3.1 Método tensão-vida

Os três principais métodos de vida sob fadiga utilizados em projeto e análises são os *métodos tensão-vida*, *deformação-vida* e o da *mecânica de fratura linear elástica*. Esses métodos tentam prever a vida, em número de ciclos até a ocorrência de falha N , para um nível especificado de carregamento. Vida de $1 \leq N \leq 10^3$ ciclos é geralmente classificada como *fadiga de baixo ciclo*, enquanto a *fadiga de alto ciclo* ocorre para $N > 10^3$ ciclos (BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Segundo BUDYNAS e NISBETT (2011), o método deformação-vida envolve uma análise mais detalhada da deformação plástica nas regiões onde as tensões e deformações são consideradas para estimativa de vida, porém ao ser aplicado este método várias idealizações devem ser compostas no que resultará em incertezas nos resultados.

O método da mecânica da fratura considera que já haja uma trinca presente detectada e é, portanto, empregado para prever o desenvolvimento desta trinca, é mais prático se aplicado a grandes estruturas ou componentes aeronáuticos.

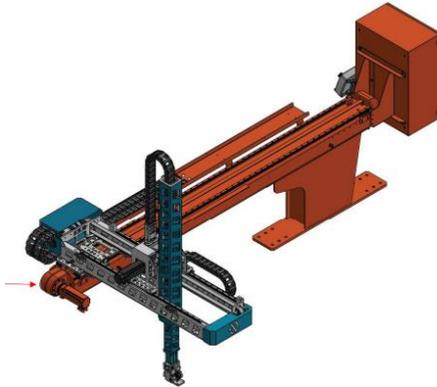
O método tensão-vida, baseando-se em níveis de

tensão é o menos acurado para aplicações de baixa ciclagem, porém, é o método mais tradicionalmente usado. Portanto, define-se que o método tensão-vida é o método mais adequado para ser empregado a este estudo.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental adotado para a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso consistiu na análise dos esforços atuantes no eixo deste estudo. Este eixo faz partedo *conjunto de movimento Z* do *Robô 3 Eixos CRF-1400* (vide Figura 8), fabricado pela empresa Andriani Industrial. Posteriormente foi realizada a análise utilizando o método dos Elementos Finitos somado aos métodos de Von Mises e Gerber para a concepção do diagrama *S-N* ou Curva de Wöhler.

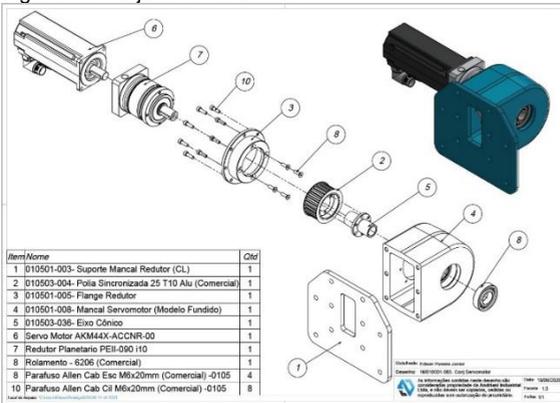
Figura 8 - Na cor laranja, conjunto de movimento Z do Robô 3 Eixos CRF-1400



Fonte: Andriani Industrial, 2020.

Na Figura acima pode-se observar uma imagem do projeto do *Robô 3 Eixos CRF-1400* extraído do *SolidWorks*, o *conjunto de movimento Z* está destacado na cor laranja, na sua extremidade a seta indica onde está o *Conjunto Servomotor* (como mostra a Figura 9), conjunto onde está localizado o eixo utilizado para este estudo.

Figura 9 - Conjunto Servomotor



Fonte: Andriani Industrial, 2020.

3.1 FORÇAS RESULTANTES SOBRE O EIXO

Foram coletadas as seguintes informações técnicas do *Robô 3 Eixos CRF-1400* quem seu eixo analisado neste estudo.

- Massa do conjunto X, Y movimentado pelo *conjunto de movimento Z* ($m_z = 130\text{kg}$);
- Eixo fabricado em aço SAE 1045;
- Massa aproximada do eixo, obtido pelo *SolidWorks* (0,30 kg);
- Posicionado sobre 4 guias lineares Hiwin HGW25CAZAC;
- Coeficiente de atrito dos guias lineares Hiwin $0,004\mu$;
- Entre centro dos eixos 3200mm;
- Curso de movimento 2500mm;
- Correia modelo 32 AT10 6650mm;
- Polias de alumínio 25 AT10, massa aproximada obtida pelo *SolidWorks* (0,35 kg);
- 10 ciclos/minuto.

Massa específica da correia:

Tabela 1- Tabela técnica sobre correias BRECOflex

Timing Belt	Pitch (mm)	Code	Ultimate Tensile Strength (N/10mm belt width)	Maximum Allowable Tensile Strength (N/10mm belt width)	Specific Belt Stiffness Steel Reinforced (Per unit width/length)	Specific Belt Mass (per 10mm belt width, steel reinforced)
AT-Series	AT3	M	1600	400	1.00 x 10 ⁶ N	0.022 kg/m
		V	-	200	-	
		BFX	1760	440	1.10 x 10 ⁶ N	
	AT5	M	2800	700	1.75 x 10 ⁶ N	0.033 kg/m
		V	-	318	-	
		BFX	3444	861	2.15 x 10 ⁶ N	
	AT10	M	6800	1700	4.25 x 10 ⁶ N	0.058 kg/m
		V	-	850	-	
		BFX	6400	1600	4.00 x 10 ⁶ N	
	AT20	M	8960	2240	5.60 x 10 ⁶ N	0.096 kg/m
		V	-	1066	-	
		BFX	8640	2160	5.40 x 10 ⁶ N	

Fonte: BRECOflex (2019).

$$mc = \frac{0,058}{10mm} * \frac{kg}{m} * b = \frac{0,058}{10mm} * \frac{kg}{m} * 32mm \rightarrow mc = 0,1856 \frac{kg}{m}$$

$$mtc = 0,1856 \frac{kg}{m} * 6,650 m \rightarrow mtc = 1,234 kg$$

$$pc = mtc * 9,807 \frac{m}{s^2} \rightarrow pc = 12,102 N$$

Sendo:

b = Largura da correia (mm);

mc = Massa da correia (kg).

mtc = Massa total da correia (kg).

pc = Peso da correia (N).

Força resultante do atrito dos guias lineares:

$$F = (\mu * n) * w = (0,004 * 4) * 1274,91 N \rightarrow F = 20,398 (N)$$

Sendo:

F = Força de atrito (N);

μ = Coeficiente de atrito;

n = Número de guias lineares;

w = Carga normal (N) ($mz * 9,807 m/s^2$).

Peso total do conjunto de movimento Z:

$$ptcz = (w + F) = (1274,91 \text{ N} + 20,398 \text{ N}) \rightarrow ptcz = 1295,308 \text{ N}$$

Sendo:

$$ptcz = \text{Peso total do conjunto de movimento Z (N)}.$$

O diâmetro primitivo da polia 25 AT10 é Ø79,58 mm, com isso determina-se o torque mínimo necessário para movimentar o *conjunto de movimento Z*.

Cada ciclo tem duração de seis segundos, destes, um segundo é dedicado ao movimento de avanço do conjunto, dois segundos para a coleta do produto, um segundo para o retorno do conjunto e dois segundos para a entrega do produto. A cada um segundo de avanço e recuo do conjunto, metade do tempo é usado para a frenagem do mesmo.

O curso de movimento é de 2500 mm, destes, 1250 mm é usado exclusivamente para afrenagem do conjunto.

Com essas informações encontraremos o torque necessário para movimentar e frear o *conjunto de movimento Z*.

$$V = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{1,25\text{m}}{0,5\text{s}} \rightarrow V = 2,5 \text{ m/s}$$

$$p = dw * \pi = 79,58 \text{ mm} * \pi \rightarrow p = 250,008 \text{ mm}$$

$$Ro = \frac{250\text{mm}}{250,008\text{mm}} \rightarrow Ro \cong 10 \text{ voltas}$$

$$\Delta\omega = \frac{\Delta Ro * 2\pi}{\Delta t} = \frac{5 \text{ voltas} * 2\pi \text{ rad}}{0,5 \text{ s}} \rightarrow \omega = 62,831 \text{ rad/s}$$

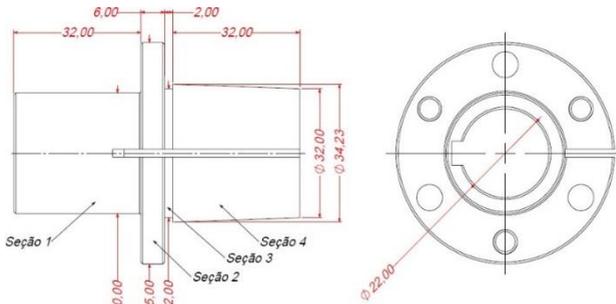
$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{62,831 \text{ rad/s} - 0 \text{ rad/s}}{0,5 \text{ s}} = \frac{62,831 \text{ rad/s}}{0,5 \text{ s}} \rightarrow \alpha = 125,662 \text{ rad/s}^2$$

Sendo:

- V = Velocidade (m/s);
- d = Distancia (m);
- t = Tempo (s);
- p = Perímetro (mm);
- dw = Diâmetro primitivo da polia (mm);
- R_0 = Quantidade de voltas da polia até metade do deslocamento; ω = Velocidade angular (rad/s);
- α = Aceleração angular (rad/s²).

Para cálculo da inércia da peça, a mesma foi dividida em seções como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Seções do Eixo



Fonte: (Andriani Industrial, 2020).

$$I_{s1} = m \frac{(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3})}{4} = 133,08 \frac{(0,03^2 + 0,022^2 + \frac{0,032^2}{3})}{4} \rightarrow I_{s1} = 0,057 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$I_{s2} = m \frac{(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3})}{4} = 133,08 \frac{(0,055^2 + 0,022^2 + \frac{0,002^2}{3})}{4} \rightarrow I_{s2} = 0,117 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$I_{s3} = m \frac{(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3})}{4} = 133,08 \frac{(0,032^2 + 0,022^2 + \frac{0,006^2}{3})}{4} \rightarrow I_{s3} = 0,050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$I_{s4} = m \frac{(R^2 + r^2 + \frac{h^2}{3})}{4} = 133,08 \frac{(0,0331^2 + 0,022^2 + \frac{0,032^2}{3})}{4} \rightarrow I_{s4} = 0,064 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

$$\sum I = I_{s1} + I_{s2} + I_{s3} + I_{s4} = 0,057 + 0,117 + 0,050 + 0,064 \rightarrow \sum I = 0,288 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Torque necessário para acelerar o conjunto de movimento Z:

$$\sum T = 1 * \alpha = 0,288 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 125,662 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \rightarrow \sum T \cong 36,190 \text{ N / m}$$

Torque necessário para desacelerar o conjunto de movimento Z:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{0 \text{ rad/s} - 62,831 \text{ rad/s}}{0,5 \text{ s}} = -\frac{62,831 \text{ rad/s}}{0,5 \text{ s}} \rightarrow \alpha = -125,662 \text{ rad/s}^2$$

$$\sum T_f = 1 * \alpha = 0,288 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 125,662 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \rightarrow \sum T_f \cong -36,190 \text{ N / m}$$

Observa-se que as tensões $\sum T$ e $\sum T_f$ caracterizam um gráfico de tensão alternada, onde a $\sigma_{max} = 36,190 \text{ N}$ e $\sigma_{min} = -36,190 \text{ N}$, sendo assim, o valor médio é igual a zero.

Sendo: I = Inercia (kg/m^2);

R = Raio externo (m);

r = Raio interno (m);

h = Comprimento da seção (m);

m = Massa (kg);

$\sum T$ = Torque necessário para acelerar o conjunto de movimento Z (N/m);

$\sum T_f$ = Torque necessário para desacelerar o conjunto de movimento Z (N/m).

Considera-se que uma correia está pré-tensionada corretamente se a parte intermediária permanecer esticada durante a operação, porém, o tensionamento da correia deve

oferecer a menor carga possível sobre o eixo. A tensão ideal da correia depende do seu comprimento e número de dentes.

Tabela 2 - Pré-tensão necessária (F_v) em função do número de dentes

Duas polias	
Nº de dentes	Pré-tensão F_v
< 60	$F_v = 1/3$ força periférica
60 a 150	$F_v = 1/2$ força periférica
> 150	$F_v = 2/3$ força periférica

Fonte: BRECOflex, 2019.

Tensão máxima permitida:

$$F_u = \frac{2000 * M}{d_w} = \frac{2000 * 135,298 \text{ N}}{79,58 \text{ mm}} \rightarrow F_u \cong 3400,301 \text{ N}$$

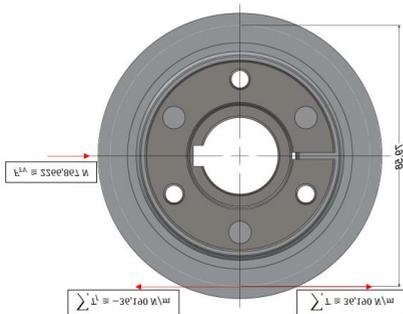
Quantidade de dentes de correia:

$$Z_R = \frac{6650}{10} \rightarrow Z_R = 665 \text{ dentes}$$

Força de pré-tensão exercida sobre o eixo:

$$F_{TV} = \frac{2}{3} = F_U = \frac{2}{3} * 3400,301 \text{ N} \rightarrow F_{TV} \cong 2266,867 \text{ N}$$

Figura 11 - Ilustração das forças atuantes sobre o eixo



Fonte: Do Autor, 2020.

3.2 SIMULAÇÃO DE FADIGA

Posteriormente a realização de todos os cálculos dos esforços atuantes sobre o eixo e com o arquivo CAD do eixo disponível, é possível iniciar a simulação de fadiga pelo SolidWorks Simulation®, o primeiro passo é realizar um estudo de análise estática que represente as forças $\sum T$ e $\sum Tf$ e um estudo de análise estática que represente a força FTV , posteriormente a isto é possível realizar o estudo de fadiga e determinar se o eixo será capaz de alcançar a vida infinita desejada neste estudo.

3.2.1 Determinando o material

O SolidWorks tem em sua biblioteca, grandes variações de materiais de engenharia disponíveis, em cada material já estão pré-determinados seus os parâmetros (Figura 12), inclusive para o aço SAE 1045 do estudo.

Figura 12 - Propriedades do Aço SAE 1045 no SolidWorks

Propriedades do material
Os materiais na biblioteca predeterminada não podem ser editados. Você precisa copiar o material para uma biblioteca personalizada para poder editá-lo.

Tipo de modelo: Salvar tipo mod. na biblioteca

Unidades:

Categoria:

Nome:

Critério de falha predeterminado:

Descrição:

Origem:

Sustentabilidade:

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	2.05e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	8e+10	N/m ²
Massa específica	7850	kg/m ³
Resistência de tração	625000000	N/m ²
Resistência à compressão		N/m ²
Limite de escoamento	530000000	N/m ²
Coefficiente de expansão térmica	1.15e-05	/K
Condutividade térmica	49.8	W/(m-K)
Calor específico	486	J/(kg-K)
Coefficiente de amortecimento do material		N/A

Fonte: Do Autor, 2020.

3.2.2 Criação da malha

Os elementos finitos são conectados entre si por nós que criam uma malha, a precisão final da simulação é diretamente afetada pela quantidade de nós disponíveis na malha, pelo tipo de elementos, pela geometria dos elementos e por suas posições, quanto maior o número de nós presente nesta malha, mais preciso será o resultado final, conseqüentemente a isto, o tempo necessário para realizar a simulação também será maior. Para este estudo foi determinado uma distância máxima de 0,5mm entre os nós (ver Figura 13).

Figura 13 - Criação da malha do eixo

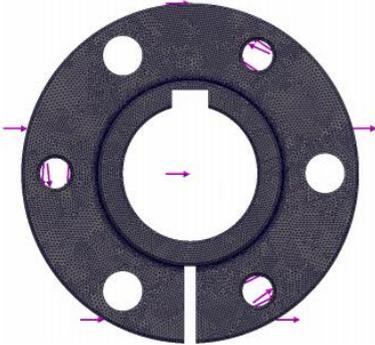


Fonte: Do Autor, 2020.

3.2.3 Interações

As interações adicionadas à simulação irão determinar como o corpo interage em conjunto com o ambiente. As interações deste estudo são determinadas pelas cargas atuantes sobre o eixo (ver Figura 14), acessórios de fixações e os contatos.

Figura 14 - Representação das forças atuantes sobre o eixo

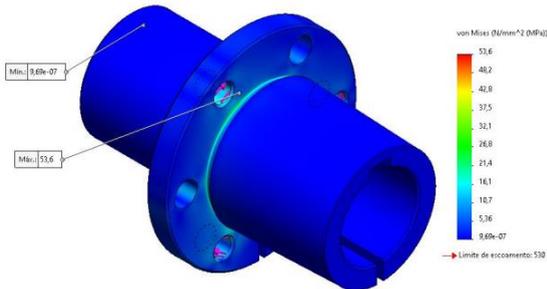


Fonte: Do Autor, 2020.

Para a realização da simulação as forças $\sum T$ e $\sum T_f$ que representam o torque que atua sobre o componente do estudo foi adicionado nas três furações que são utilizadas para fixar a polia ao eixo, pois, é o local onde o torque é transmitido para o restante do componente. A força F_{TV} resultante do esticamento da correia está atuando diretamente na polia e perpendicularmente a peça, então para a simulação a força F_{TV} também foi adicionada nas mesmas furações para que seja simulada a realidade do ambiente de estudo.

3.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES ESTÁTICAS

Figura 15 - Resultado do estudo estático de torque

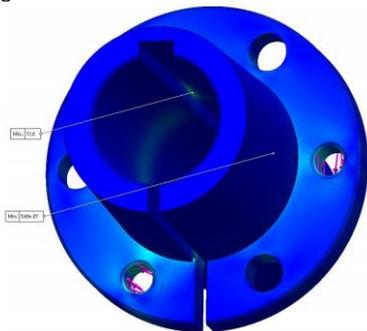


Fonte: Do Autor, 2020.

Observa-se que na Figura 15 e 16 o torque é distribuído

ao eixo por três furos roscados onde ficam localizados os parafusos que engastam a polia ao eixo, fica claro que há concentrações de tensões no local dos furos roscados e na seção do “flange” do eixo, porém, o maior resultado de concentração de tensão fica no rasgo de chave interna, na mesma seção onde está o local do “flange”. A maior tensão resultante sobre o eixo é de $53,6 \frac{N}{mm^2}$, valor muito inferior ao limite de escoamento do material.

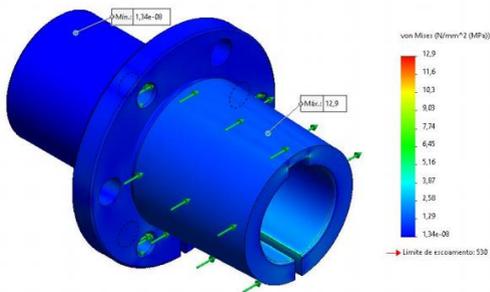
Figura 16 - Resultado do estudo estático de torque



Fonte: Do Autor, 2020.

Na Figura 16 observa-se que no local do rasgo de chave interna na mesma seção do “flange” se encontra o local de maior concentração de tensão da “análise estática” das forças ΣT e ΣT_f que representam o torque.

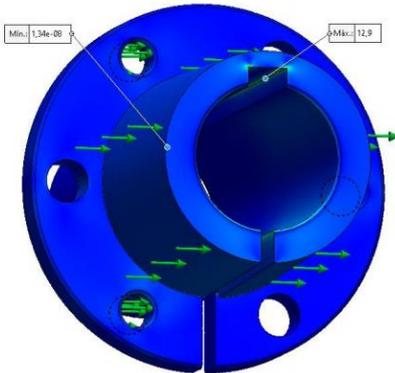
Figura 17 - Resultado do estudo estático da força FT_V



Fonte: Do Autor, 2020.

Na Figura 17 a força F_{TV} da “análise estática 2” representa valores semelhantes da análise estática anterior, onde a força resultante do estudo é de $12,9 \frac{N}{mm_2}$ sobre o eixo, observa-se que o local de maior concentração de tensão é na seção do rasgo de chaveta interna (ver Figura 18), do eixo, pois, a força F_{TV} está sobre a polia, que é fixada ao eixo nesta seção, porém, assim como o estudo anterior, os valores estão consideravelmente abaixo do limite de escoamento do material.

Figura 18 - Resultado do estudo estático da força F_{TV}



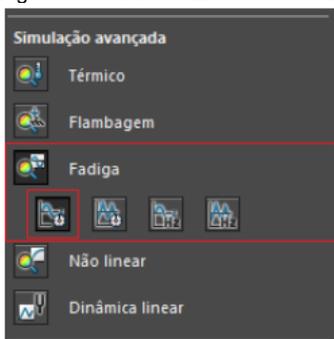
Fonte: Do Autor, 2020.

Na Figura 19 observa-se que no local do rasgo de chaveta interna do eixo se encontra o local de maior concentração de tensão da “análise estática 2” da força F_{TV} que representam o a força do esticamento da correia sobre a polia.

3.3.1 Iniciando o estudo de fadiga

Inicialmente deve-se realizar um novo estudo, onde, será configurada uma análise de fadiga que permitirá determinar se o componente estudado é capaz de suportar as forças resultantes que atuam sobre si durante o período de tempo esperado.

Figura 19 - Início do Estudo de Fadiga

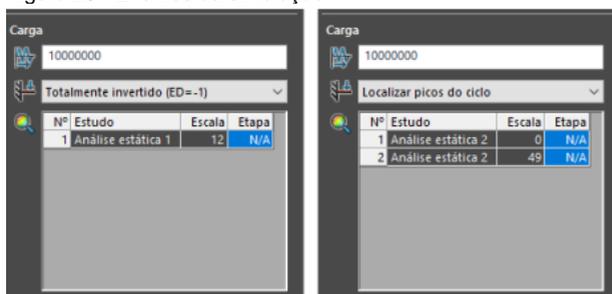


Fonte: Do Autor, 2020.

Para este estudo de fadiga é escolhido à opção “eventos de amplitude constante com ciclos definidos”, pois, um evento de amplitude constante é definido por uma tensão alternada, tensão média e o número de ciclos (Figura 19). O software irá calcular os piores níveis de estresse alternado de cada evento que for adicionado ao estudo.

3.3.2 Adicionando eventos

Figura 20 - Eventos da simulação



Fonte: Do Autor, 2020.

O estudo “Análise estática 1”, Figura 20, representa as forças $\sum T$ e $\sum T_f$, observa-se que para a simulação será baseada em 10^7 ciclos, o mínimo para se alcançar a vida infinita do componente são 10^6 ciclos. Para as forças $\sum T$ e $\sum T_f$,

também foi determinado como critério o estudo “Totalmente invertido (ED=-1)”, esta opção determina que a carga é totalmente revertida durante o número de ciclos que foi determinado.

O estudo “Análise estática 2” representa a força F_{TV} da simulação e o critério de estudo “Localizar picos do ciclo”, é uma especificação que baseia-se em encontrar a maior tensão alternada para cada nó da malha, esta especificação é usada para uma carga não oscilante presente na simulação, porém, para este estudo é necessário uma variação na escala para que o *software* possa identificar a maior tensão alternada. Observa-se que para a realização desta simulação, também será baseada em 10^7 ciclos.

Para determinar os fatores de escala de cada evento a Dassault Systemes indica que o cálculo se dá através de um evento de fadiga baseado em um estudo de referência com cargas dimensionadas. Para o evento 1 usaremos $\frac{S_{ut}}{53,6} = 11,75 \cong 12$ para o valor da escala, para o evento 2 usaremos $\frac{S_{ut}}{12,9} = 48,83 \cong 49$ para o valor da escala. Os valores da escala são arredondados, pois, o *software* aceita apenas números inteiros para valores de escala.

3.3.3 Dados de fadiga

Segundo a “*Figura 06 - Diagrama S-N ou curva de Wöhler*” vista anteriormente, para a criação do Diagrama S-N são necessárias às informações S_{ut}, S_f' e S_e' . Para a realização da simulação, deve-se alimentar o *software* com as mesmas informações. O valor de S_{ut} pode ser encontrado na tabela A-25 presente no livro *Elementos de máquinas de Shigley*. Para encontrar os valores de S_f respectivos para cada número de ciclos também são usados informações da mesma tabela, introduzidos a equação $S_f' = \sigma_f' (2N)^b$.

Segundo Norton (2013), $S_e' = 0,5 * S_{ut}$, então, $S_e' = 0,5 * 630 \rightarrow S_e' = 315 \text{ Mpa}$.

Segundo Budynas e Nisbett (2011), se a equação de

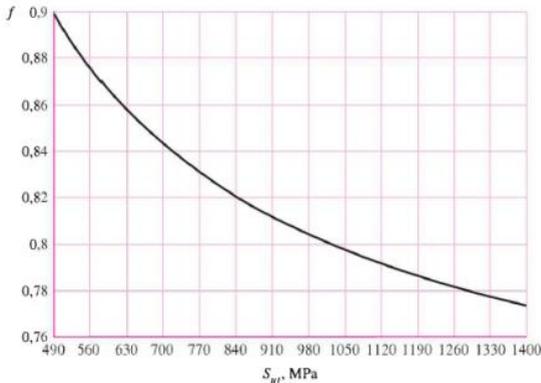
tensão verdadeira contra a deformação verdadeira não for conhecida, a aproximação SAE para aços $H_B \leq 500$ pode ser usada $\sigma_f' = S_{ut} + 345 \text{ Mpa}$, então, $\sigma_f' = 630 \text{ Mpa} + 345 \text{ Mpa} \rightarrow \sigma_f' = 975 \text{ Mpa}$.

Tabela 3 - Informações da tabela A-25

MATERIAL	H_B	S_{ut} (Mpa)	$S_{e'}$ (Mpa)	$\sigma_{f'}$ (Mpa)
Aço SAE 1045 Trefilado	179	630	315	975

Fonte: Budynas; Nisbett, 2011.

Figura 21 - Fração da resistência à fadiga



Fonte: Budynas; Nisbett, 2011.

$$b = -\frac{1}{3} \log \frac{(f * S_{ut}')}{S_{e'}} = -\frac{1}{3} \log \frac{(0,858 * 630)}{315} \rightarrow b = -0,0781$$

$$S_{f'}(10^1) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^1)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^1) \cong 771,603 \text{ Mpa}$$

$$S_{f'}(10^2) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^2)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^2) \cong 644,605 \text{ Mpa}$$

$$S_{f'}(10^3) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^3)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^3) \cong 538,51 \text{ Mpa}$$

$$S_{f'}(10^4) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^4)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^4) \cong 449,877 \text{ Mpa}$$

$$S_{f'}(10^5) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^5)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^5) \cong 375,832 \text{ Mpa}$$

$$S_{f'}(10^6) = \sigma_{f'}(2N)^b = 975 * (2 * 10^6)^{-0,0781} \rightarrow S_{f'}(10^6) \cong 313,974 \text{ Mpa}$$

Sendo:

S_{ut} = Resistencia de tração mínima (Mpa);

S_e ' = Limite de endurance, a peça alcança a vida infinita (Mpa);

S_f ' = Resistencia a fadiga (Mpa);

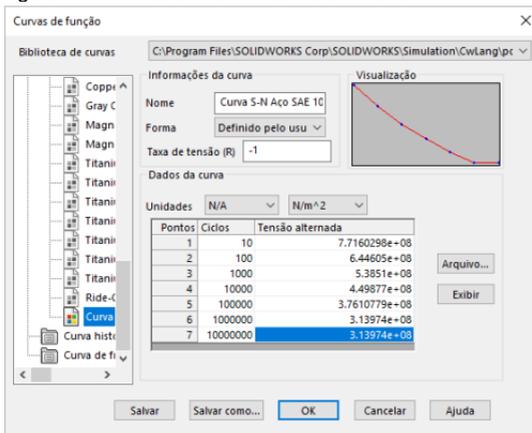
σ_f ' = Coeficiente de resistência à fadiga (Mpa);

N = Número de ciclos;

b = Expoente de resistência à fadiga,

HB = Dureza Brinell.

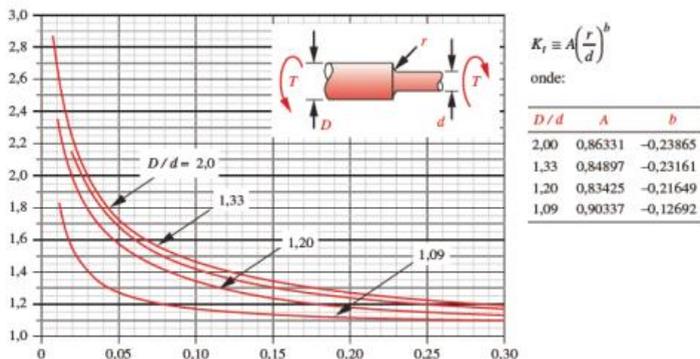
Figura 22 - Dados alimentados no software



Fonte: Do Autor, 2020.

Na imagem 22 acima, o item “Taxa de tensão (R)” com valor -1, determina que a curva S-N é baseada em uma carga totalmente invertida. O próximo passo para dar continuidade à simulação é encontrar o valor de K_f , determinar o cálculo de tensão alternada e o método da correção da tensão média, utilizando dados da Figura 23 e 24.

Figura 23 - K_t para eixo com rebaixo arredondado em torção



Fonte: Norton, 2013.

$$\frac{D}{d} = \frac{55}{30} = 1,833$$

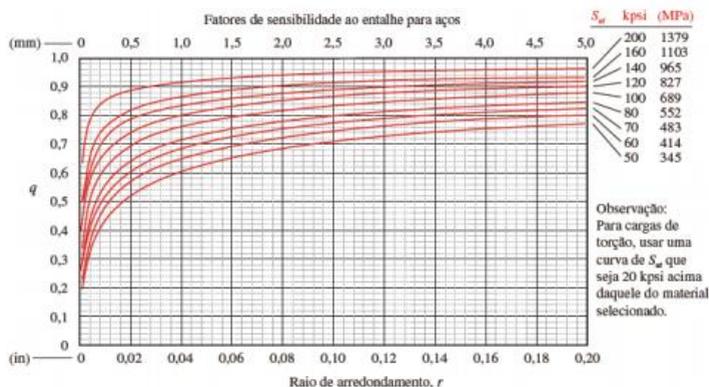
$$\frac{r}{d} = \frac{0,2}{30} = 0,06$$

$$K_t \cong 1,62$$

Sendo:

K_t = Fator de geométrico de concentração de tensão.

Figura 24 - Fator de sensibilidade ao entalhe



Fonte: Norton, 2013.

$$q \cong 0,6$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,6(1,62 - 1) \rightarrow K_f = 0,992$$

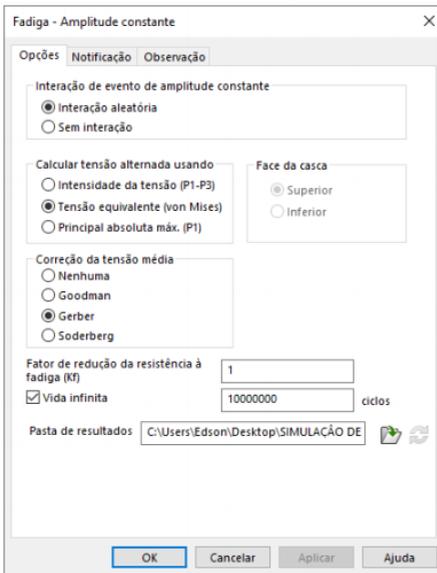
O valor de K_f usado na simulação será 1, pois, é o valor mínimo aceito pelo software.

Sendo:

q = Fator de sensibilidade ao entalhe;

K_f = Fator de redução da resistência à fadiga.

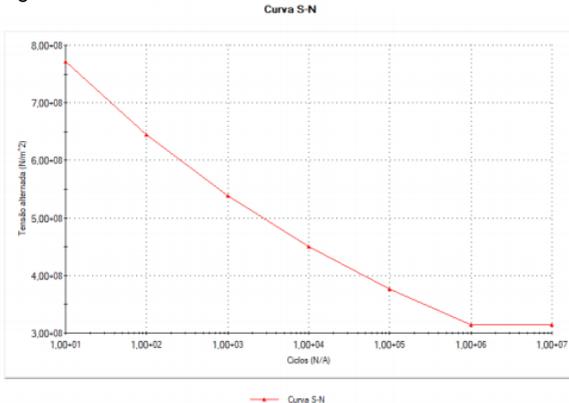
Figura 25 - Métodos de simulação



Fonte: Do Autor, 2020.

3.3.4 Curva S-N

Figura 26 - Curva S-N extraída do SolidWorks



Fonte: Do Autor, 2020.

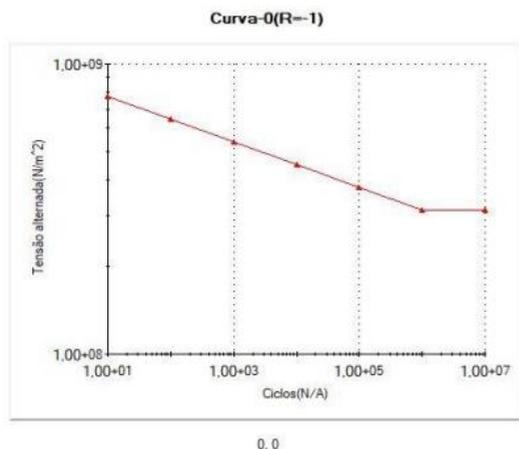
A *Figura 26* representa uma curva S-N teórica para o aço SAE 1045 Trefilado com $S_{ut} = 630 \text{ Mpa}$, a criação desta curva foi possível após a introdução dos valores de tensão alternada máxima para cada número de ciclos no *software SolidWorks*. Os valores introduzidos ao *software* servem como base para o resultado da simulação, se as tensões forem maiores do que as disponíveis na curva S-N, então, o corpo analisado no estudo não é capaz de suportar os esforços para o número de ciclos desejado.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

No *SolidWorks* existe a obrigatoriedade de serem feitos estudos estáticos antes de um estudo de fadiga, pois, os resultados desses estudos estáticos somados aos eventos configurados que resultam em um estudo de fadiga.

4.1 SIMULAÇÃO DE VIDA EM FADIGA

Figura 27 - Curva S-N da simulação de fadiga



Fonte: Do Autor, 2020.

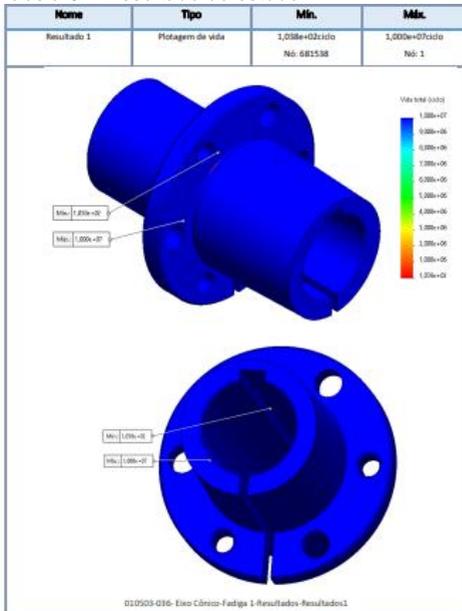
Na *Figura 27* observa-se a curva S-N que foi extraída do relatório de estudo de fadiga desta simulação, nota-se que os valores estão abaixo dos valores máximos para um aço SAE 1045 trefilado exemplificados na *Figura 26*, isto prova que baseado neste estudo o corpo analisado suporta as tensões que estão sendo expostas ao mesmo.

Tabela 4 – Opções de carregamento

Nome do evento	Nº de ciclos	Tipo de carregamento	Associação de estudo		
			Nome do estudo	Fator de escala	Etapa
Evento-1	10000000	Totalmente invertido (ED=-1)	Nome do estudo	Fator de escala	Etapa
			Análise estática 1	12	0
Evento-2	10000000	Localizar picos do ciclo	Nome do estudo	Fator de escala	Etapa
			Análise estática 2	0	0
			Análise estática 2	49	0

Fonte: Do Autor, 2020.

Tabela 5 – Resultado do estudo.



Fonte: Do Autor, 2020.

O diagrama de cores disponível na *Tabela 5* está demonstrando que o valor mais alto de tensão sofrido pelo eixo foi no ciclo $1,038^2$, observa-se que ao decorrer dos ciclos o aço vai normalizando conforme as tensões aplicadas nos seus números de ciclos. Na cor vermelha está representado o local que o componente sofre o maior esforço de tensão, e assim como nos estudos estáticos observa-se que o local de maior concentração de tensão é na seção do “flange” do eixo. Como resultado do estudo de vida em fadiga do eixo que está presente no *Robô 3 Eixos CRF-1400*, determina-se que o mesmo está dimensionado para alcançar a vida infinita, inclusive abrindo margem para possibilidade de ser alterado a matéria prima do eixo por algum aço de menor custo.

5 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho era a realização de um estudo de um componente mecânico através de métodos conhecidos das engenharias. O componente escolhido para o estudo foi um eixo vazado, que em sua geometria há pontos de concentrações de tensões, para identificar estes pontos e as tensões que atuam sobre eles foram utilizados os métodos dos elementos finitos somado ao método tensão-vida.

Os cálculos necessários para a realização do método tensão-vida identificados como ideais para a realização deste estudo são provenientes dos cálculos de tensão equivalente de Von Mises e dos cálculos da correção da tensão média de Gerber, para que seja possível montar as duas equações são necessários o uso de valores tabelados, porém, a geometria pouco comum do eixo faz com que os cálculos manuais não sejam possíveis devido à falta de tabelas para algumas formas de geometria do eixo, para contornar este problema é possível realizar simulações computacionais em *softwares* de engenharia, o escolhido foi o *SolidWorks Simulation®*, pois, através dele é possível realizar a simulação de vida em fadiga utilizando os métodos e cálculos mencionados anteriormente.

O estudo resultou na obtenção da curva S-N do aço SAE 1045 estriado a frio, com a curva S-N, foi possível validar através de simulação computacional que os esforços resultantes sobre o eixo não são suficientemente grandes a ponto de impedir que o eixo não tenha vida infinita.

Os resultados do estudo se mostraram satisfatórios, pois, o componente estudado é uma peça vital para o funcionamento do *Robô 3 Eixos CRF-1400* produzido pela Andriani Industrial e está presente em mais de 20 empresas espalhadas por todo território nacional.

REFERÊNCIAS

BRECOFLEX. **SM5 Universal Belt Tension Meter**. Disponível em: <https://www.brecoflex.com/literature>. Acesso

em: 29 Ago. 2020.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2011.

DASSAUT Systemes. **Criação de um estudo de fadiga para carregamento harmônico**. Disponível em: http://help.solidworks.com/2016/portuguesebrazilian/solidworks/cworks/t_defining_fatigue_harmonic_load.html. Acesso em: 11 Nov. 2020.

ENSUS. **Elementos Finitos**: o que é? Quando utilizar? Quais são os benefícios?. Disponível em: <https://ensus.com.br/elementos-finitos-quais-os-beneficios/>. Acesso em: 14 jun. 2020.

FRANKLIN, Derrick. **7 steps to perform a fatigue analysis in solidworks simulation®**. Disponível em: <https://www.goengineer.com/blog/7-steps-to-perform-a-fatigue-analysis-in-solidworks-simulation>®. Acesso em: 06 Nov. 2020.

HIWIN. **Linear Guideways**. Disponível em: https://www.hiwin.com/pdf/linear_guideways.pdf. Acesso em: 29 Ago. 2020.

NORELEM. **Indicação técnica sobre as correias dentadas 22052 e 22057**. Disponível em: <https://www.norelem.com/us/pt/Download/Documentos.html>. Acesso em: 29 Ago. 2020.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

PUCHI-CABRERA, E. S. *et al.* High cycle fatigue behavior of

316L stainless steel. **International Journal of Fatigue**, v. 30, 2008.

RAOTOLE, M. L.; SADAPHALE, D. B.; CHAUDHARI, J. R. Prediction of fatigue life of crank shaft using S-N approach. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 2, 2013.

RETHWISCH, David G.; CALLISTER, William D.; **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

SCHNEIDER. **Polias sincronizadoras AT10**. Disponível em: http://correias.com.br/download/correia_sincronizadora_at10.pdf. Acesso em: 29 Ago. 2020.

SHADIKU, M. N. 0; **Elementos de eletromagnetismo**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SILVA, A. *et al.* Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos. **Exacta**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 207-219, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=81046356005>. Acesso em: 11 jun. 2020.

SKA. **SolidWorks 2013** – Simulation® Nível I. Disponível em: <https://www.ska.com.br> Acesso em: 11 Nov. 2020.

SOUZA, S. A. d; **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**: fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1982.

TSCHIPTSCHIN, André. **Análise pelo método dos elementos finitos**: seleção de materiais e análise de falhas. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/pmt2501/Elementos%20finitos.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2020.

UFPR. **O método dos elementos finitos**. Disponível em:

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM266/Apostila/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20ao%20MEF.pdf>. Acesso em: 14 Jun. 2020.

ESTUDO DE TRAÇÃO EM MÉTODOS DE LIGAÇÃO DE PEÇAS 3D IMPRESSAS EM ABS

Julia de Jesus Barcelos¹

Rodolfo Bortoluzzi²

Derek Manoel Luup Carvalho³

Resumo: Com o crescimento do ramo de impressoras 3D observa-se uma necessidade de estudar as particularidades dos materiais utilizados e quais as melhores formas de trabalhar com os mesmos. Neste estudo, o foco é um problema causado por pontos frágeis devido às ligações de peças impressas. Tais ligações são comuns por uma multitude de motivos, tais como limitações dimensionais, montagens complexas ou até mesmo falhas de impressão. O artigo propõe-se a definir uma estratégia de ligação eficiente em situações de tração para peças impressas no plástico ABS, material muito popular entre os usuários de impressoras 3D. Para tal, corpos de prova foram impressos e colados com diversos tipos de materiais e submetidos a testes de tração. Os valores obtidos dos testes passam por uma análise qualitativa e quantitativa, que ajudará a definir qual a melhor escolha para o estudo proposto. Dentre os diversos materiais incluídos na pesquisa, a Cola universal Brascoart® Brascola® destacou-se como mais eficiente, devido seu alto ponto de ruptura e flexibilidade.

Palavras-chave: Impressão 3D. Filamento ABS. Ensaio de tração.

1 INTRODUÇÃO

Os princípios da impressão 3D remetem desde o aparecimento das impressoras de jato de tinta comuns, em

¹ E-mail: juuliabarcelos@hotmail.com.

² E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

1976. Conforme os avanços desta ideia, aplicaram-se a tecnologia na área da medicina, obtendo-se o primeiro rim funcional impresso em 3D em 2002. Desde então, os avanços na área de impressão 3D tem sido formidáveis, com aplicações em diversas indústrias, com o objetivo de criar protótipos de forma rápida e eficiente. Hoje vemos estudos para impressão 3D na área da construção civil e até mesmo no ramo alimentício. (TELLES; MORAIS, 2016)

O ramo impressão 3D tem-se popularizado, com crescimento anual de 25% de acordo com Chaves (2019), devido à praticidade na criação de peças exclusivas e à criação de protótipos de baixo custo relativo. Pode-se observar o crescimento de impressoras domésticas, sejam elas como forma de *hobby* ou para negócios.

Com essa popularização, percebe-se refinamentos nos processos de impressão 3D, como maior variedade de polímeros com diferentes especificações técnicas. Os polímeros mais populares para impressão 3D doméstica são ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), PETG (Polyethylene terephthalate) e PLA (Ácido Poliláctico). (3DLAB, 2019)

O PLA é popular devido à facilidade de impressão, sem a necessidade de mesa aquecida, similar ao PETG, enquanto o ABS tem sua popularidade devida a relativa aceitação à tratamentos químicos, tratamentos térmicos e pinturas, além do valor relativamente acessível. (3DLAB, 2019)

As impressoras 3D domésticas são um ótimo recurso, porém apresentam uma limitação em seu tamanho de impressão, em uma média de mercado de 5832 cm³ (18 x 18 x 18 cm), baseado nos modelos mais populares do mercado (JESUS, 2016). Essa restrição não é compartilhada por suas equivalentes industriais ou impressoras diferenciadas, como a HangPrinter.

A limitação de tamanho impede a criação de grandes projetos em pequenas impressoras. Para contornar este problema, usuários dividem uma peça de tamanho grande em pequenas partes e usam de colas e outros materiais de ligação para uni-las.

Na tentativa de solucionar o problema causado pela

limitação no tamanho das impressoras domésticas, os usuários costumam a imprimir peças que superem esse limite dimensional dividindo uma peça grande em pequenas partes. Para que a apresentação das peças impressas em 3D formadas pela colagem de peças menores fique com uma apresentação homogênea, utilizam-se de diversas formas de acabamento.

Outros usos para a ligação de peças impressas vêm de outros fatores, tais como a redução do tempo de impressão, peças de montagem mais complexas, partes das peças impressas de cores diferentes e reutilização de peças com impressão interrompida. Todos estes casos utilizam do processo de colagem.

Entretanto, essa solução engenhosa traz um problema: a criação de pontos frágeis nas ligações. Se aplicadas em situações de esforços, essas partes divididas tendem à sucumbir e arruinar a peça final.

Este trabalho propõe um estudo com diversos materiais de ligação, definindo uma estratégia mais eficiente em situações de tração, a fim de melhorar a qualidades de tais peças impressas em ABS.

O estudo dos materiais de ligação para peças impressas em plástico ABS trará benefícios para a comunidade de usuários de impressão 3d. Dentre estes, pode-se citar uma melhoria na tecnologia já disponível, mais resistências nas montagens, capacidade de produção de projetos maiores e de grandes complexidades.

A identificação dos melhores materiais de ligação também beneficiará empresas que fazem o transporte de peças coladas, aumentando a resistência e melhorando a relação com o cliente, além da vida útil das peças.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 IMPRESSÃO 3D

A impressão tridimensional tem como forma de

funcionamento a extrusão de termoplásticos, utilizando estes materiais acima da sua temperatura de transição vítrea, na qual eles exibem mais flexibilidade e propriedades de fluxo. (SKORSKI et al, 2016)

Existem vários processos e parâmetros que influenciam a resistência final da peça, qualidade, custo e tempo de produção incluindo, mas não limitado a: seleção de material e suporte, espessura da camada, design de impressão, espessura da parede, padrão de enchimento e uniformidade das condições de impressão da extrusora e/ou temperatura do leito. (BAICH; MANOGHARAN; MARIE, 2015).

2.2 CARACTERÍSTICAS DO FILAMENTO ABS

Cada filamento possui características de extrusão diferente, incluindo o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno), utilizado neste estudo. A empresa Simplify3D disponibilizou um quadro com diferentes características dos filamentos, identificadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades do ABS

Força Máxima	40 MPa
Temperatura Máxima de Serviço	98 ° C
Coefficiente de expansão térmica	90 $\mu\text{m} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$
Densidade	1,04 g / cm ³
Temperatura da Extrusora	220 - 250 ° C
Temperatura do leito	95 - 110 ° C

Fonte: Simplify3D, 2019.

Além disso, o filamento ABS tem como especificações a resistência a impacto e calor, além de relativa aceitação a tratamentos químicos, motivo pelo qual o material ABS foi escolhido para este estudo. O ABS da F3DB não possui aditivos.

2.3 CARACTERÍSTICAS DAS COLAS E MATERIAIS DE LIGAÇÃO ESCOLHIDOS PARA O ESTUDO

Para a realização dos ensaios de tração, serão utilizados diferentes tipos de colas e materiais de ligação nas peças impressas em ABS. Todos os materiais possuem indicação de uso para plásticos. No quadro 2 é possível ver as composições informadas pelos fabricantes.

Quadro 2 – Propriedades dos materiais de ligação

NOME COMERCIAL	COMPOSIÇÃO
Cola Super Bonder Loctite®	Etilcianoacrilato, Ácido 2 - porpenóico, 2 - metil, éster metílico, homopolímero, 6, 6' di-terc-butil - 2, 2'- metilendi-p-cresol
Durepoxi® Loctite® (Massa epóxi bicomponente)	Resina: Sulfato de bário, resina de difenol epichlorohidrina - 4, 4' - isopropilideno, silicato de alumínio e dióxido de titânio. do endurecedor é silicato de alumínio, ácidos graxos, produtos de reação oligomérica e trietilenotetraminam, 2, 4, 6 - Tri (dimetilaminometil) fenol, 6,3 – diazaoctano -1,8 - diamina.
Cola de contato Brascoplast® Brascola®	Borrachas e resinas sintéticas, solventes alifáticos e tolueno.
Cola universal Brascoart® Brascola®	Resinas sintéticas e solventes oxigenados.
Adesivo instantâneo Tek Bond® Saint-Gobain®	Etil-Cianoacrilato.
Cola epóxi Araldite® fix pastosa cinza Tek Bond® Saint-Gobain® (bicomponente)	Resina : resina epóxi e carbon black. Endurecedor: 2, 4, 6- tris(dimetilaminometil)fenol, siloxanos e silicones, di-Me e produtos de reação com sílica.
Cola epóxi Araldite® transparente Tek Bond Saint-Gobain® (bicomponente)	Resina: resina epóxi. Endurecedor: Trietilenoglicol-dimercaptano, Dimethyldipropyltriamine, N, N, 4 – trimetilpiperazina – 1 - etilamina, N-butyl acetate.
Solução preparadora Tigre®	Acetona e metiletilcetona.
“Cola ABS”	Mistura caseira com 50% de plástico ABS misturados à 50% de Solução preparadora Tigre®

Fonte: LOCTITE® (2019); LOCTITE® (2019); BRASCOPLAST® (2019); BRASCOPLAST® (2019); SAINT-GOBAIN® (2019); SAINT-GOBAIN® (2019); SAINT-GOBAIN® (2019); TIGRE® (2019).

A solução preparadora Tigre® é um material utilizado

para limpar e preparar tubos e conexões de PVC para solda, entretanto tem sido usado com sucesso na comunidade de impressão 3D como método de cola para plástico ABS. O produto é feito à base de acetona e metiletilcetona. A solução derrete o plástico ABS, permitindo que as partes sejam coladas depois da secagem.

Um método também utilizado por usuários da solução preparadora Tigre® é criação de uma cola feita com o próprio plástico ABS. Em um pote de vidro, faz-se uma mistura contendo 50% do próprio plástico e 50% da solução. O produto resultante é então usado para colar as peças, rendendo um resultado satisfatório. Como mostrado no quadro 2, a mistura é conhecida como Cola ABS pela comunidade de usuários de impressoras 3D.

3 PROCEDIMENTO METOLÓGICO

A área de Impressão 3D já possui artigos explorando as características físicas e químicas dos materiais mais populares, tal como o ABS, utilizado na pesquisa bibliográfica para escolha de material para os testes. Porém, certas áreas possuem um nicho muito específico, tal como o problema definido neste artigo, o que requer uma pesquisa exploratória do assunto.

Ao fazer os testes de tração em diversas amostras com variados tipos de colas, será possível alcançar uma gama de dados de resistência à tração em relação aos diferentes materiais de ligações usados, permitindo uma análise quantitativa e qualitativa das amostras.

Os testes foram feitos na Faculdade de Capivari (FUCAP), utilizando equipamento para ensaio de tração presente na instituição. O método consiste na aplicação de força em direção opostas que age na superfície de um corpo, sofrendo uma deformação na direção do esforço. (ZOLIN, 2010). Ao comparar os dados para cada tipo de material de ligação, obter-se-á um consenso de qual é o mais recomendado para diferentes tipos de situações.

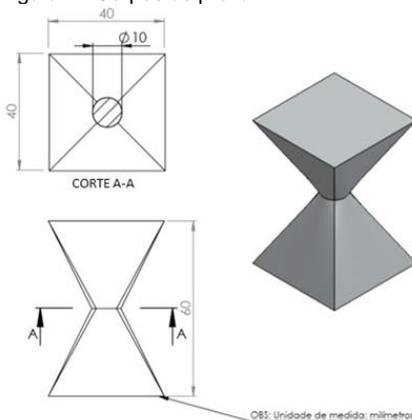
Entretanto, os ensaios feitos com as peças não focará na deformação da peça e sim na verificação do material mais adequado para ligação de peças ABS, que será determinado pela quantidade de força suportada na máquina de ensaio de tração.

A impressora 3D My3D será utilizada para criação das peças de teste e a máquina de ensaio de tração para análise dos melhores resultados. Para impressão dos corpos de prova, serão utilizados filamentos de ABS da marca F3DB.

Os corpos de prova serão elaborados com o auxílio do *software* SolidWorks® Student Edition e depois convertidos em formato .stl para o uso do aplicativo Cura Ultimaker 4.2.1, que transforma a peça em camadas para impressão. Além do equipamento, diversos tipos de colas e materiais de ligação serão testados, sendo estes os citados na revisão bibliográfica.

O primeiro passo para os testes de tração é a elaboração do corpo de provas. Para tal, utilizou-se o *software* SolidWorks® Student Edition. O corpo de prova consiste de duas peças iguais de formato piramidal com topo arredondado, os quais serão colados para determinar o melhor material de ligação. É possível ver o desenho técnico do corpo de prova na Figura 1, com medidas em milímetros.

Figura 1 - Corpos de prova



Fonte: Da Autora, 2019.

O desenho é então convertido para .stl e aplicado no software Cura Ultimaker 4.2.1, que o transforma em camadas para impressão. Os parâmetros de impressão aplicados foram os mostrados no quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de impressão

PARÂMETRO	VALOR
Densidade de preenchimento (<i>Infill Density</i>)	20%
Padrão de preenchimento (<i>Infill Pattern</i>)	Linhas (lines)
Porcentagem de sobreposição de preenchimento (<i>Infill Overlap Percentage</i>)	50%
Grossura da camada de preenchimento (<i>Infill Layer Thickness</i>)	0,2 mm
Temperatura de impressão	245 °C
Temperatura da mesa de impressão	102 °C
Velocidade de impressão	60 mm/s
Tamanho do bico extrusor	0,5 mm

Fonte: Da Autora, 2019.

Após a impressão dos corpos de prova, os mesmos foram colados com os materiais escolhidos para o estudo. Colaram-se três pares para cada material de ligação a fim de obter um resultado mais preciso, utilizando o método científico.

Os corpos de peça, já então colados, foram levados para o laboratório da FUCAP onde os testes de tração foram efetuados. Para tal, as peças foram coladas a pares de pinças, como 8 demonstrado na figura 2, e anexados à máquina de tração por via de garras, como demonstrado na figura 3.

Figura 2 - Corpos de prova colados e anexados às pinças



Fonte: Da Autora, 2019.

Figura 3 - Corpo de prova preso à máquina de ensaio de tração



Fonte: Da Autora, 2019.

O processo foi repetido para todos os corpos de prova até obter-se os resultados.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

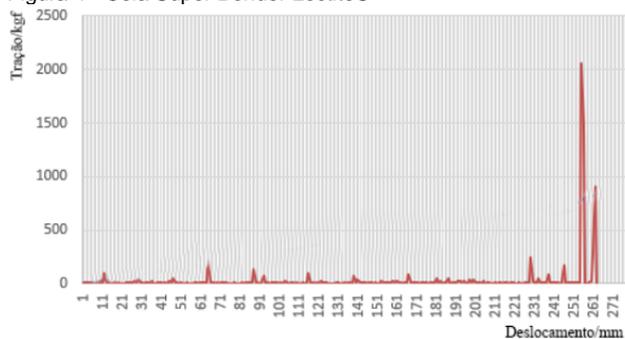
Neste capítulo serão apresentados os resultados e comentários dos testes realizados. Após a realização dos ensaios de tração, os valores obtidos serão avaliados e comparados por via de gráficos.

O primeiro material a ser descartado foi a cola de contato Brascoplast® Brascola®. Os corpos de prova ligados por este material não foram nem ao menos submetidos ao ensaio de tração, pois a colagem realizada era facilmente desfeita com as mãos. Logo, a cola de contato Brascoplast® Brascola® pode ser considerada como inapropriada para colagem de plástico ABS.

O segundo material testado foi a cola Super Bonder Loctite®. Dos três corpos de prova preparados para o ensaio, dois quebraram antes mesmo de serem encaixados na máquina de tração. Mais dois corpos de ensaio foram preparados na tentativa de realizar o experimento, mas estes sofreram o mesmo destino de seus antecessores. Sendo assim, somente uma peça dentre cinco foi analisada.

A figura 4 mostra o gráfico obtido do ensaio da cola Super Bonder Loctite®, apresentando características elásticas e uma alta resistência à tração, atingindo picos de 2055 kgf e 1473 kfg antes de sua quebra ao esforço de 908 kgf. Apesar dos valores altos, as ligações com o material cola Super Bonder Loctite® demonstraram baixa resistência a outros esforços, como cisalhamento, antes do teste ser efetuado.

Figura 4 - Cola Super Bonder Loctite®



Fonte: Da Autora, 2019.

Na figura 5 vemos o desempenho do Adesivo instantâneo Tek Bond® Saint-Gobain®. O material demonstrou uma consistência em sua elasticidade, mantendo o mesmo padrão de oscilação nas três amostras. Duas amostras tiveram um desempenho similar, rompendo aos 460,6 kgf e 515 kgf, enquanto a terceira rompeu aos 906 kgf.

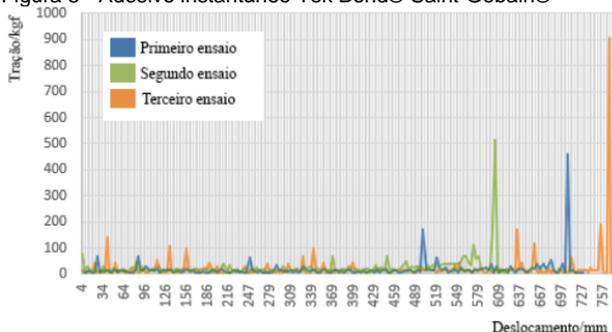
O adesivo da Saint-Gobain® demonstrou um desempenho superior ao da cola da Loctite® quanto ao número de amostras aptas ao teste, no entanto com menor tensão de ruptura.

Todos os corpos de prova foram submetidos ao mesmo processo de colagem, passando pelo mesmo tempo de secagem natural. Uma possível explicação para a variação seria a absorção da cola pelo filamento poroso, sendo esta maior na peça com alto ponto de tensão de ruptura.

Sobretudo, o comportamento consistente das três diferentes amostras não levanta preocupações quanto aos

resultados, categorizando seu ponto de ruptura por tensão entre 500 kgf e 900 kgf.

Figura 5 - Adesivo instantâneo Tek Bond® Saint-Gobain®



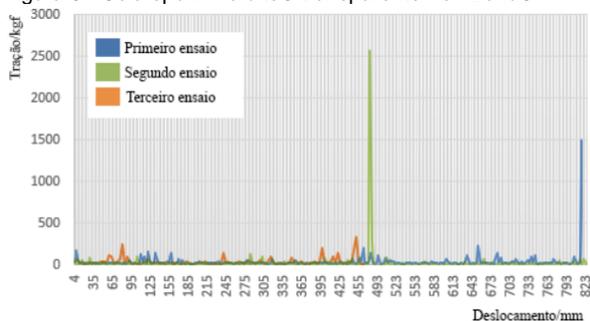
Fonte: Da Autora, 2019.

O material cola epóxi Araldite® transparente Tek Bond Saint-Gobain® apresentou resultados conflitantes, como vistos na figura 6. Em uma das amostras, identificada pela cor verde no gráfico, o material suportou um pico de 2579,2 kgf, mas esse valor não causou o rompimento da ligação (amostra sofreu deformação plástica). Essa amostra em particular rompeu em um valor de aproximadamente 75 kgf.

A segunda amostra, identificada pela cor laranja, também rompeu em um valor relativamente baixo de 322 kgf. Em contraste, a terceira amostra identificada pela cor azul no gráfico, rompeu após atingir um pico de 1494,5 kgf.

A cola epóxi Araldite® transparente Tek Bond Saint-Gobain® é um adesivo bicomponente, então é possível que diferentes porcentagens da mistura apresentem resultados variados, apesar do cuidado tomado para que ambas fossem igualmente aplicadas. Outra observação importante é que este material não apresentou características elásticas tão evidentes quanto aos materiais anteriores, indicando uma quebra mais seca.

Figura 6 - Cola epóxi Araldite® transparente Tek Bond®



Fonte: Da Autora, 2019.

A análise da cola epóxi Araldite® fix pastosa cinza Tek Bond® Saint-Gobain®, também bicomponente, mostrou alta divergência de valores tal como a amostra anterior.

A primeira amostra, identificada na figura 7 pela cor azul, apresentou uma força inicial anormal de 1616,2 kgf e prosseguiu com força relativamente estável durante o restante do percurso. A variação de forças fica dentro de 140 kgf a 10 kgf até atingir o ponto de ruptura na faixa dos 20 kgf. É possível que o ponto inicial tenha causado uma rachadura na ligação que foi progressivamente se partindo durante o teste.

A segunda amostra apresentou comportamento similar à primeira, com exceção do altíssimo ponto inicial. A amostra, identificada pela cor laranja, rompeu aos 280 kgf.

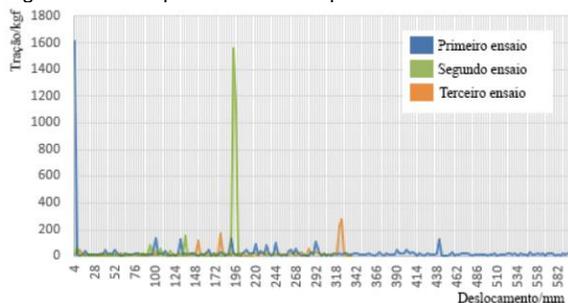
Já a terceira amostra, de cor verde, começa normalmente na média das anteriores, mas alcança seu ponto de ruptura aos 1557,6 kgf. Essa anomalia pode ser justificada por uma alteração feita durante os ensaios. O terceiro corpo de prova da cola epóxi Araldite® fix pastosa cinza Tek Bond® Saint-Gobain® teve de ser refeito devido a sua ruptura durante o trajeto, logo, teve um tempo de secagem menor do que as duas primeiras amostras.

Ambas as colas da Araldite® apresentaram o mesmo comportamento cristalino, característico de cianoacrilatos, que causam cristais devido a um efeito de envelhecimento das cadeias carbônicas. Estes tendem a apresentar alta resistência inicial, mas logo que esses novos são desfeitos, os cristais

são quebrados e a resistência cai, até que as cadeias poliméricas fiquem novamente estendidas.

Observa-se esse comportamento nos picos dos gráficos das figuras 6 e 7, que tem comportam-se como vítreo. Os picos antes da quebra indicam que os cristais sofreram a quebra, enquanto os pontos de quebra baixa indicam um comportamento elastomérico.

Figura 7 - Cola epóxi Araldite® fix pastosa cinza Tek Bond®



Fonte: Da Autora, 2019.

A solução preparadora Tigre® apresentou resultados interessantes. Para este material, somente dois corpos de prova foram analisados, pois o terceiro foi comprometido devido a uma queda.

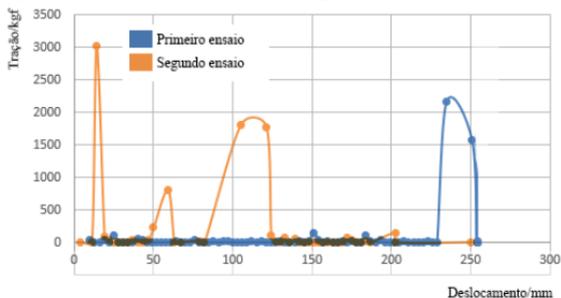
Como é possível analisar na figura 8, as duas amostras cederam com uma quantidade de avanço quase idêntica, mas a relação com a tração foi quase oposta. Uma delas recebeu altas tensões durante o decorrer do experimento, atingindo até 3018,8 kgf no começo de seu ciclo, mas rompeu em um período de baixo valor.

Já a outra manteve estabilidade e baixa flexibilidade durante o experimento, mas sucumbiu à tração de 2168,9 kgf no final do percurso, por fim rompendo. É possível comparar as duas diretamente na figura 8.

A diferença de comportamentos pode ser justificada pela forma que os polímeros se reagruparam após a aplicação da solução preparadora Tigre®, que age derretendo o ABS.

Após o derretimento, as fibras plásticas se reorganizam formando uma peça unificada.

Figura 8 - Solução preparadora Tigre®



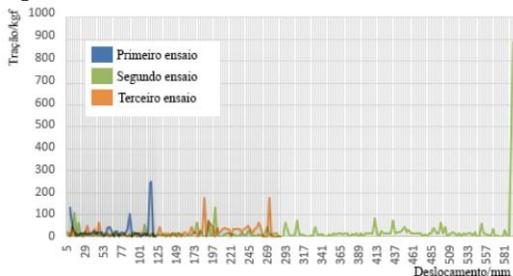
Fonte: Da Autora, 2019.

Para a mistura de ABS com a solução preparadora Tigre®, conhecida como cola ABS, os resultados foram significativamente diferentes. A mistura demonstrou flexibilidade maior do que apenas a solução preparadora Tigre®.

Entretanto uma das amostras teve um percurso muito maior e suportou uma carga de 887,7 kgf, enquanto as outras duas atingiram a ruptura antes dos 300 kgf.

A figura 9 mostra o gráfico de comportamento, onde a linha laranja indica um comportamento vítreo da amostra, com deformação elástica (qubra dos critais inicial). Já o azul apresenta um comportamento elastomérico, permanecendo unido sem ceder até a quebra final.

Figura 9 - Cola ABS



Fonte: Da Autora, 2019.

A massa Durepoxi® Loctite®, similar a cola Super Bonder Loctite®, alcançou um resultado impressionante em uma das amostras, mas falhou nas restantes. Das três amostras iniciais, duas partiram antes de serem colocadas na máquina e dentre as duas substitutas, uma também apresentou falha antes mesmo do teste.

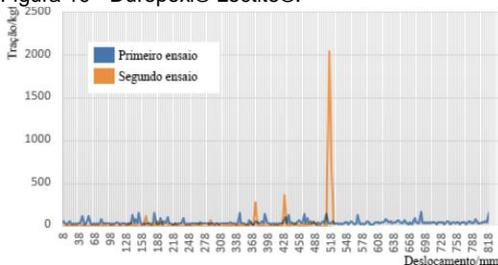
Por ser uma massa de secagem longa, a primeira amostra e a segunda tiveram diferentes tipos de secagem, portanto não é surpreendente que elas tenham apresentado resultados tão divergentes, tanto em deslocamento quanto em tração.

Uma das amostras atingiu o ponto de ruptura aos 2051,6 kgf enquanto a outra manteve-se estável durante o percurso, rompendo aos 138,2 kgf, como pode-se ver na figura 10. Indiferentemente do ponto de ruptura, a massa Durepoxi® Loctite® já havia provado-se inapropriada devido ao fato de que de cinco amostras preparadas para teste, apenas duas não quebraram por pequenos impactos causados pelo manuseio das peças.

A linha laranja do gráfico indica a primeira colagem, que secou por mais tempo, justificando a maior resistência da ligação. Por ser um material com base em ácidos graxos, não deveria apresentar comportamento vítreo cristalino como os bicomponentes Araldite®. Sua alta resistência final pode ser justificada pelo maior tempo de secagem, enquanto.

O segundo corpo de prova, da linha azul, manteve um comportamento elastomérico esperado, mas sem alcançar os grandes valores do material seco por mais tempo.

Figura 10 - Durepoxi® Loctite®.

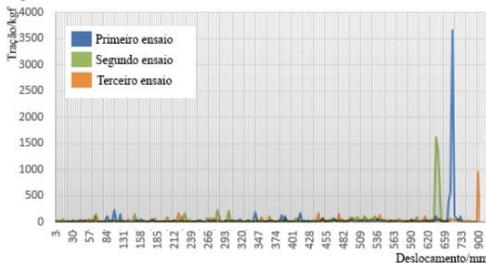


Fonte: Da Autora, 2019.

A cola universal Brascoart® Brascola® demonstrou grande consistência nos seus resultados, suportando altos valores de tensão por um avanço relativamente alto. As amostras atingiram seus pontos de ruptura aos 943,3 kgf, 1624,5 kgf e 3659,4 kgf, como é possível observar na figura 11.

Além disso, as amostras apresentaram um valor interessante de elasticidade, permitindo que haja uma boa resistência a impactos em peças de ABS ligadas com a cola universal Brascoart® Brascola®.

Figura 11 - Cola universal Brascoart® Brascola®



Fonte: Da Autora, 2019.

Realizados os testes cujos resultados foram demonstrados nos gráficos acima apresentados, percebe-se que a cola universal Brascoart® Brascola® apresentou melhor resultado, podendo ser entendido como o mais adequado para a realização das ligações e colagens de peças impressas em 3D, destacando-se a análise final de cada um dos produtos testados no capítulo conclusivo do presente estudo.

5 CONCLUSÕES

Com este estudo, foi possível descartar três materiais de ligação como apropriados para peças impressas em ABS: cola de contato Brascoplast® Brascola®, cola Super Bonder Loctite® e massa Durepoxi® Loctite®. A primeira por total ineficácia na ligação dos corpos de prova e as duas últimas por falta de resistência à outros esforços quais não o de tração.

As colas epóxi Araldite® da Tek Bond® Saint-Gobain®, tanto a transparente quanto a fix cinza, apresentaram resultados promissores, porém inconsistentes. Tais inconsistências prejudicam o uso dos materiais, criando um fator de irregularidade que pode ou não danificar a vida útil da peça.

A solução preparadora Tigre® apresentou pontos de ruptura altos, o que se torna atrativo, mas a evidente falta de flexibilidade inviabiliza o uso para outros impactos, tornando-se não ideal. Já a cola ABS apresenta um problema oposto, com uma flexibilidade interessante, mas pontos de ruptura muito baixos.

O adesivo instantâneo Tek Bond® Saint-Gobain® apresentou bons resultados, com flexibilidade e pontos de ruptura consistentes e altos o suficiente para justificar o uso deste material como ligação para peças impressas em ABS.

Entretanto, a cola universal Brascoart® Brascola® apresentou boa flexibilidade e resistência significativamente maior em todos os testes, atingindo a resistência de quase 4000 kgf, tornando-se uma escolha superior ao adesivo instantâneo Tek Bond® Saint-Gobain®. Logo, dentre todos os materiais de ligação estudados, a cola universal Brascoart® Brascola® distinguiu-se como a mais indicada para a colagem de peças impressas em ABS.

REFERÊNCIAS

3DLAB. **Conheça as propriedades técnicas dos materiais para impressora 3D**. 2019. Disponível em: <https://3dlab.com.br/propriedades-dos-materiais-para-impressora-3d/>. Acesso em: 01 jun. 2019.

BAICH, Liseli; MANOGHARAN, Guha; MARIE, Hazel. **Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts**. Youngstown: Youngstown State University, 2015. 12 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guha_Manogharan/publication/295396135_Study_of_i

nfill_print_design_on_production_cost- time_of_3D_printed_ABS_parts/ links/5774656308aeb9427e2422e6.pdf. Acesso em: 05 jul. 2019.

BRASCOPLAST®. **Cola de contato Brascoplast®.**

Brascola®, 2019.

CHAVES, Léo Ramos. **O avanço da impressão 3D.** 2019.

Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/02/11/o-avanco-da-impressao-3d/>. Acesso em: 22 ago. 2019.

JESUS, Aline. **Impressora 3D:** veja os preços dos principais modelos no Brasil. 2016. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/listas/noticia/2016/01/impressora-3d-veja-os-precos-dos-principais-modelos-no-brasil.html> . Acesso em: 01 jun. 2019.

LOCTITE®. **Cola Super Bonder.** Loctite®, 2019.

LOCTITE®. **Durepoxi®.** Loctite®, 2019.

SAINT-GOBAIN®. **Adesivo instantâneo Tek Bond®.** Saint-Gobain®, 2019.

SAINT-GOBAIN®. **Cola epóxi Araldite® fix pastosa cinza Tek Bond®.** SaintGobain®, 2019.

SAINT-GOBAIN®. **Cola epóxi Araldite® transparente Tek Bond.** Saint-Gobain®, 2019.

SIMPLIFY3D. **Filament properties table.** 2019. Disponível em: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/>. Acesso em: 05 jul. 2019.

SKORSKI, Matthew R. *et al.* **The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed materials composed of TiO₂.** ABS nanocomposites, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/14686996.2016.1152879>. Acesso em: 27 maio 2019.

TELLES, Vanessa; MORAIS, William A. **Impressão 3D**. Curitiba: Universidade Positivo, 2016. Disponível em: <http://www.cronosquality.com/artigos/ar007.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.

TIGRE®. **Solução preparadora**. Tigre®, 2019.

ZOLIN, Ivan. **Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas**. 3. ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010. 102 p. il.

FUNDIÇÃO DE PEÇAS DE METAL COM MOLDES EM PLÁSTICO PRODUZIDO POR PROTOTIPAGEM RÁPIDA

Tiago Cardoso Cesario¹
Rodolfo Lucas Bortoluzzi²
Derek Manoel Luup Carvalho³

Resumo: Na Engenharia Mecânica existem diversas áreas interessadas no estudo de fundição por prototipagem rápida, com a intensificação da concorrência e a complexidade dos produtos fabricados, as empresas tiveram que se adequar as alterações no processo de fabricação e desenvolvimento aliado a qualidade do produto. Para que as empresas pudessem se manter no mercado competitivo dos dias atuais, gestões, técnicas, projetos, análises e simulações foram alguns dos aspectos de mudanças imediatas associadas à habilidade da empresa. O objetivo do presente artigo é fazer um estudo sobre a fundição de peças de metal com moldes em plástico produzido por prototipagem rápida com o veículo mini Baja da Faculdade FUCAP e fornecer um método rápido e eficiente para a produção de moldes de fundição para o projeto. O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, o aluno se envolve em um caso real de desenvolvimento do veículo off road, desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes. A utilização da impressão 3D pode facilitar e agilizar a produção de peças protótipo com alta precisão dimensional, visando solucionar o problema de qualidade nos moldes de fundição do projeto.

Palavras-chave: Prototipagem rápida. Fundição. Impressora 3D. Baja SAE BRASIL.

¹ E-mail: tiagocardoso.cesario@hotmail.com.

² E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A fundição de peças de metal através de impressora 3D acelera o processo de desenvolvimento de produtos, tornando desnecessário o processo de investir em ferramentas para fabricar geometrias que caso precisasse de modificações teriam que ser refeitas, tornando o processo demorado e caro. O protótipo pode ser fabricado com qualidade, em volume e diminuindo o risco de alterações.

A prototipagem rápida é um conjunto de tecnologias desenvolvidas para fabricar objetos a partir de fontes de dados geradas por um sistema de projeto e auxiliado por um computador, estes projetos agregam e ligam camadas e mais camadas de um material, constituem e formam o objeto desejado. Este método permite criar rapidamente protótipos a partir de projetos, permitindo testes prévios para verificar pontos de concentração e tensões da peça.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é estudar e definir um método de produção de moldes de fundição de alumínio a partir de impressões em 3D. Através de pesquisas bibliográficas, impressões de modelos em 3D, desenvolver moldes de fundição e verificar a qualidade do material fundido. Este trabalho ainda permitirá o experimento no desenvolvimento do projeto mini veículo BAJA e análise de suas etapas.

O Processo de fundição é conhecido desde antigamente e é amplamente utilizado, durante vários anos vem se aperfeiçoando em todo o seu ramo, visando aprimorar processos, aumentar a produtividade e qualidade dos seus produtos. Essas experiências podem ser empregadas para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura e diferentes conceitos de produto, procurando novas definições. (VOLPATO et al., 2007).

Para facilitar a modelagem inicial de peças protótipo para veículo mini baja temos a necessidade de esculpir uma peça modelo para criar o molde de fundição. Essa tarefa nem sempre é simples dada a complexidade das geometrias

requeridas. A utilização da impressão 3D pode facilitar e agilizar a produção de peças protótipo com alta precisão dimensional. O presente trabalho visa solucionar o problema de qualidade nos moldes de fundição do projeto mini baja.

O programa Baja SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. Ao participar do programa Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo off road, desde sua concepção, projeto detalhado, construção e testes.

Este trabalho visa fornecer um método rápido e eficiente para a produção de moldes de fundição para o projeto mini baja.

Com maior competitividade no mercado, as empresas estão buscando tecnologias para auxiliar e melhorar seus processos, qualidade dos produtos, reduzir custos e tempo de produção. Neste contexto, surgiu a impressão 3D, onde através de uma representação matemática da superfície em 3D de um objeto estereolitografia, criamos formas e cenários através da utilização de um software.

A prototipagem rápida permite a elaboração de métodos de desenvolvimento de produtos, sendo este realizado em etapas, permitindo a interação de diversas áreas como: planejamento, desenvolvimento e execução, tendo como principal foco o desenvolvimento de componentes funcionais, protótipos e formas de objetos em um curto período de tempo, e respeitando as especificações exigidas para o produto final (VOLPATO et al., 2007).

Segundo Pipes (2010), um dos principais benefícios obtidos com a utilização da prototipagem rápida é a visualização do produto, o que proporciona uma compreensão espacial dos modelos, sendo que estes podem ser produzidos em pequena escala. Assim, a impressão 3D está se tornando uma técnica bastante utilizada na fase do processo do projeto, em que os produtos são produzidos diretamente através de um modelo computacional, o que elimina o uso de ferramentas,

diminui o tempo e os custos da produção.

A aplicação 3D nos permite realizar moldes e ajustes, o que não ocorre na produção tradicional, onde a principal causa de atrasos e custos é o retrabalho.

A escolha da tecnologia a ser aplicada baseia-se no tipo de estado inicial da matéria-prima que será utilizada na fabricação, podendo ser classificados em: sólido, líquido e pó (VOLPATO et al., 2007).

O primeiro passo para criação do projeto é desenvolver o objeto no computador através de um software de edição CAD, assim que o modelo estiver pronto, é necessário enviá-lo para o software da impressora e definir características como dimensões e resolução da imagem. Quanto mais informações e detalhes melhor será a qualidade do objetivo e maior será o tempo de confecção do objeto. Após apresentar para o software todos os dados necessários, o mesmo cria o objeto com camadas que são enviadas para a impressora onde se inicia o processo de criação, o injetor de material após aquecimento puxa um filamento plástico, derrete o material e o injeta em uma base, movimentando os eixos para criar as camadas. (VOLPATO et al., 2007).

Assim que a camada da base fica pronta, ela desce alguns milímetros e procede com a criação até que o objeto fique pronto. O que vai determinar o tempo, tamanho e detalhes da peça.

O processo de fundição deve ser escolhido para definir qual o grau de precisão dimensional, acabamento e propriedades da peça a ser fabricada. O material para a fabricação do molde é importantíssimo neste processo. Hoje no Brasil, existem vários métodos de fundição de metais, porém o mais utilizado é o uso de moldes confeccionados em areia. As principais etapas do processo começam por confeccionar o modelo da peça com o formato da peça final, podendo ser em madeira, metal, plástico, gesso, isopor, resina, entre outros. O próximo passo é a confecção do molde, onde o metal será despejado e sua cavidade é similar à da peça final, o mesmo resiste as altas temperaturas (Gesso de fundição).

Este molde terá a peça em 3d coberta por gesso refratário, em uma das cavidades será despejado o metal líquido por gravidade e a outra cavidade será utilizada para saída de ar.

Fundição se trata de fabricação de um determinado objeto ou peça onde um metal ou liga metálica líquida é vazado em um formato idêntico ao da peça a ser produzida. Dentre as vantagens das peças fundidas, a mais atraente é que a mesma pode apresentar formas desde a mais simples até a mais detalhada, podendo ser produzida em padrões variados de acabamentos e dimensões.

Dentro do processo de fundição por cera perdida, foi utilizado um molde produzido a partir da peça impressa 3D em material PLA, a mesma é colocada em uma caixa e preenchida com o gesso refratário, é aguardado o tempo de secagem do gesso e após esta etapa o molde é aquecido ao ponto de escoamento de fusão do material PLA. O embasamento do alumínio no molde é feito com o cadinho, onde o forno aquece o mesmo a 900°C para que haja um bom escoamento do alumínio e preenchimento do molde, formando a cópia correta da peça.

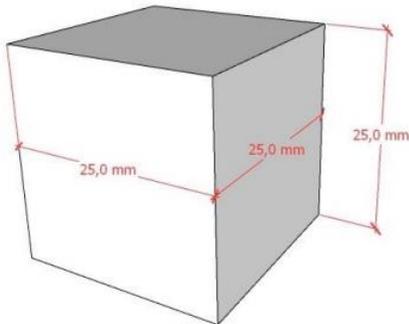
Após todo o desenvolvimento dos processos, será verificado se as Ligas de A-206 Al e Cu e a liga 356 Al e Si apresentaram alterações na microestrutura, conseqüentemente nas suas propriedades mecânicas através de ensaios não destrutivos.

Para realização desde projeto, basicamente utilizou-se de pesquisas em livros, formulários, pesquisas bibliográficas, computador, software SOLIDWORKS para projeção, Microsoft Word e Excel para desenvolvimento dos dados coletados e organização dos mesmos. Amostra de liga de alumínio, impressora 3D, PLA, gesso de fundição e o laboratório de mecânica FUCAP. Com os resultados encontrados, será executado o processo de fabricação das principais peças do veículo BAJA SAE. Afim de aprimorar o processo, trabalhando em cima de qualidade, detalhamento, tempo de execução e custos.

2 MÉTODOS E RESULTADOS

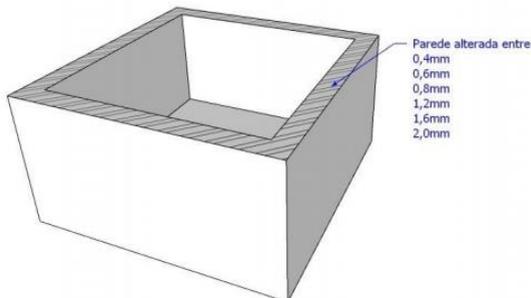
Foi desenhado em AutoCAD um modelo 3D, dimensões de 25,00 mm x 25,00 mm.

Figura 1 - Ilustração da peça com a medida desejada, peça projetada em CAD, para em segunda etapa inicia a impressão em PLA, gerando as coordenadas x, y, z e configurando todos os parâmetros de impressão para melhor peça final.



Fonte: Do Autor, 2019.

Figura 2 – Ilustração da peça em corte com alteração da parede, peça impressa em PLA, e com seus parâmetros de impressão configurados sem nervuras no interior da peça, variando a espessura da parede em 6 peças, dentro de 0,40 mm a 2,00 mm, para posteriormente analisar qual melhor resultado dentro do material fundido.



Fonte: Do Autor, 2019.

Com base no modelo digital em STL produzido pelo AutoCAD, foi possível realizar a etapa de pós processamento e conseqüentemente obtenção do código G para utilização na

impressora 3D.

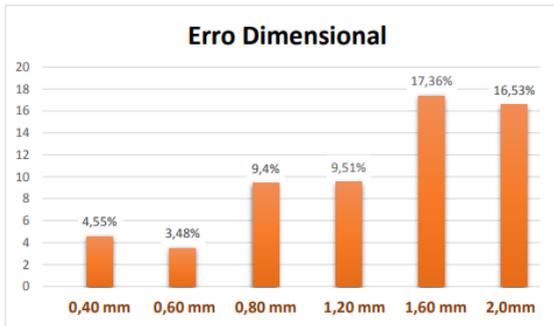
Com a impressora 3D de polímeros e o modelo digital em STL foram produzidas seis cubos de variações de parede 0,40 mm, 0,60 mm, 0,80 mm, 1,20 mm, 1,60 mm, 2,00 mm.

Os cubos assim produzidos foram colocados em um recipiente de plástico e os moldes impressos em 3D foram envolvidos em gesso, deixando apenas a entrada de material fundido e uma saída de gases. O Alumínio da liga A-206 foi fundido a 900°C e após a secagem completa do gesso aproximadamente quarenta e oito horas, os mesmos foram preenchidos com alumínio metálico fundido.

Deixou-se o conjunto resfriar e posteriormente o gesso foi quebrado, permitindo a recuperação das peças de alumínio fundidas. A partir dessas peças foram feitas as análises dimensionais, visuais e de rugosidade a partir deste ponto.

Diante das análises efetuadas, foram encontrados os seguintes resultados: defeito dimensional, defeito gasoso, peça incompleta, defeitos superficiais, variando de acordo com a espessura da peça piloto. Dentre os defeitos, está o dimensional.

Figura 3 – Gráfico de comparação do erro dimensional das amostras analisadas em peça



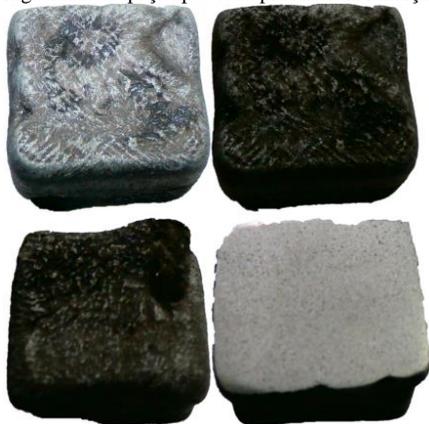
Fonte: Do Autor, 2019.

As peças que apresentam menor desvio dimensional em relação as dimensões teóricas esperadas, foram as com menor espessura de parede do molde de plástico impresso, variando a espessura do molde de 0,40 mm para 2,00 mm, a

variação do desvio percentual dimensional foi de 3,48% no caso da parede 0,60 mm no melhor caso verificado, ou seja, para cada milímetro medido na peça fundida foram esperados teoricamente 1,03 mm, para 17,36% de desvio no caso da parede do molde de plástico com 1,60 mm, ou seja, a tendência é que ao se aumentar a espessura das paredes do molde o erro dimensional aumenta.

Porém foi verificado que espessuras de parede abaixo de 0,60 mm causam também um aumento de erro dimensional.

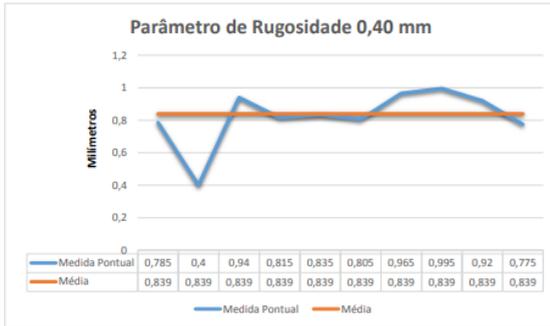
Figura 4 – Ilustração do resultado da peça com parede impressa em 3D em 0,40 mm, mostra a rugosidade da peça após todo processo de fundição, da peça envolvida em molde de gesso.



Fonte: Do Autor, 2019.

A ilustração da Fig. 4 mostra a peça fundida em molde com parede de 0,40 mm. A Fig. 5 (Gráfico de parâmetro de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D, como mostra a seguir:

Figura 5 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 0,40 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,108 3mm \cong 108,30\mu m \quad \text{Equação 1}$$

Figura 6 – Ilustração do resultado da peça com parede impressa em 3D em 0,60 mm, Obtivemos o resultado de uma peça com superfície dentro do esperado, com coa rugosidade e erro dimensional muito baixo

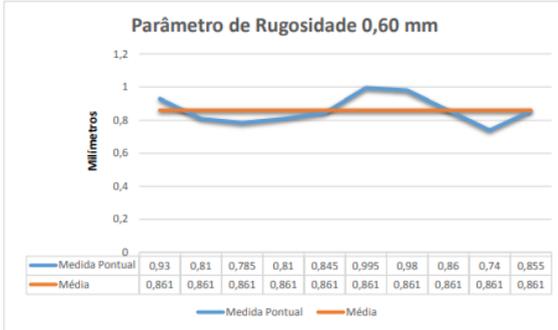


Fonte: Do Autor, 2019.

A ilustração da fig. 6 mostra a peça fundida em molde com parede de 0,60 mm. A fig. 7 (Gráfico de parâmetro de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D,

como mostra a seguir:

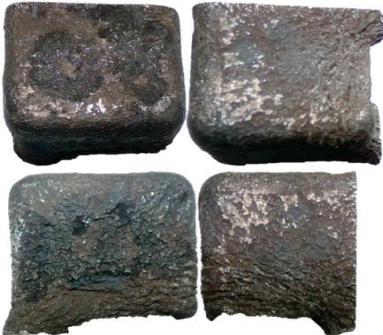
Figura 7 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 0,60 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,0634mm \cong 63,40\mu m \quad \text{Equação 2}$$

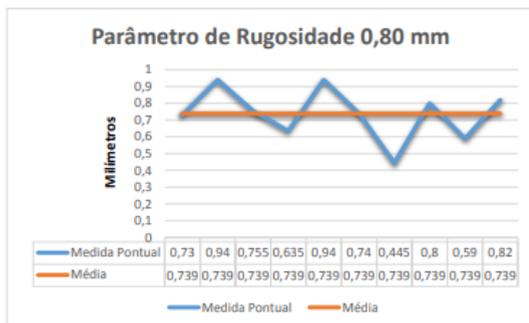
Figura 8 – Ilustração do resultado da peça com parede impressa em 3D em 0,80 mm, com o aumento da parede do PLA no processo de impressão, percebemos o erro dimensional e a rugosidade muito alta



Fonte: Do Autor, 2019.

A foto da figura 8 mostra a peça fundida em molde com parede de 0,80 mm. A fig. 9 (Gráfico de parâmetro de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D, como mostra a seguir:

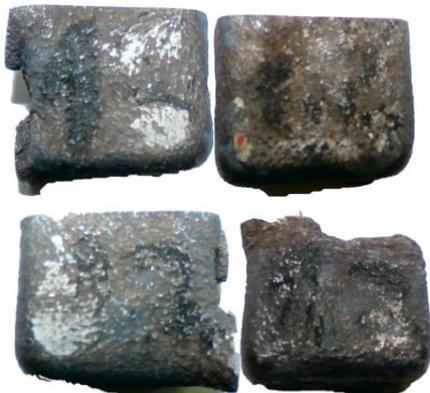
Figura 9 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 0,80 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,1117mm \cong 111,70\mu m \quad \text{Equação 3}$$

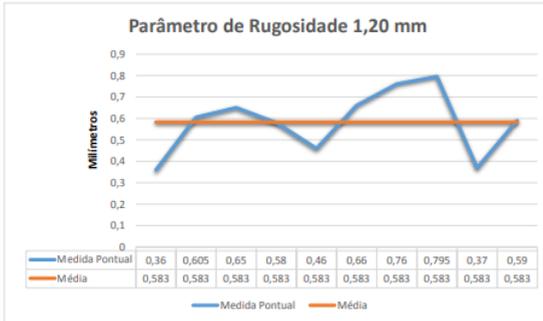
Figura 10 – Ilustração do Resultado da peça com parede impressa em 3D em 1,20 mm (Fonte: Autor). Alguns defeitos foram surgindo na medida em que o PLA foi aumentando, como rugosidade alta e defeitos de medidas muito foda do projeto inicial



Fonte: Do Autor, 2019.

A ilustração da figura 10 mostra a peça fundida em molde com parede de 1,20 mm. A fig. 11 (Gráfico de parâmetro de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D, como mostra a seguir:

Figura 11 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 1,20 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,1124mm \cong 112,40\mu m \quad \text{Equação 4}$$

Figura 12 – Ilustração do resultado da peça com parede impressa em 3D em 1,60 mm, visivelmente percebemos defeitos na peça, com suas faces rugosas, defeitos de geometrias e dimensionais

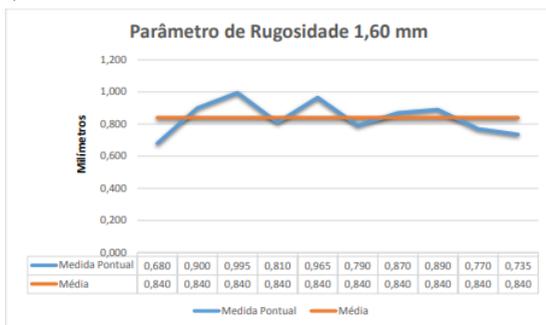


Fonte: Do Autor, 2019.

A ilustração da figura 12 mostra a peça fundida em molde com parede de 1,60 mm. A fig. 13 (Gráfico de parâmetro de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade

para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D, como mostra a seguir:

Figura 13 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 1,60 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,0835mm \cong 83,50\mu m \quad \text{Equação 5}$$

Figura 14 – Ilustração do resultado da peça com parede impressa em 3D em 2,00 mm, peça com a maior parede de PLA, com defeito dimensional alto, porém sua rugosidade não está alta, devido ao alumínio a 900°C não conseguir expulsar todo PLA de dentro do molde

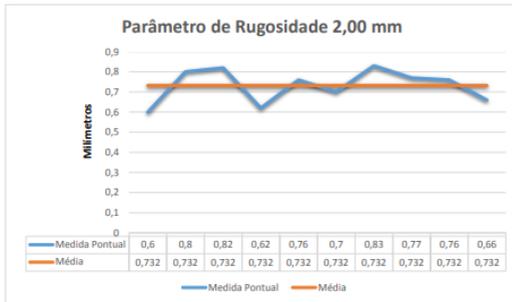


Fonte: Do Autor, 2019.

A ilustração da figura 14 mostra a peça fundida em molde com parede de 2,00 mm. A fig. 15 (Gráfico de parâmetro

de rugosidade) mostra as medidas e médias de rugosidade para a mesma peça fundida com molde de plástico impresso em 3D, como mostra a seguir:

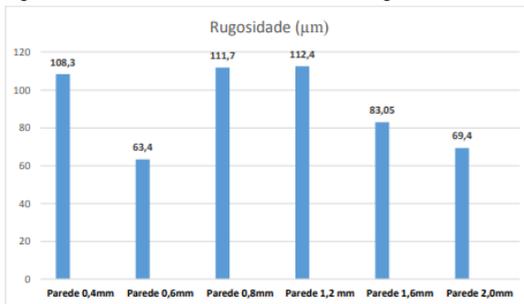
Figura 15 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade analisado no corpo de prova da peça 2,00 mm



Fonte: Do Autor, 2019.

$$Ra = \sum |y - \bar{y}| n \cong 0,0696mm \cong 69,60\mu m \quad \text{Equação 6}$$

Figura 16 – Gráfico de Parâmetro de Rugosidade de todas as peças analisadas



Fonte: Do Autor, 2019.

Através de dados e fotos das figuras apresentas acima é possível verificar claramente que o melhor acabamento superficial é apresentado pelo molde com parede de espessura 0,60 mm, a rugosidade é também afetada pela espessura do molde, possivelmente devido a variação de defeitos gasosos durante a combustão do plástico utilizado no molde, e consequentemente a expansão destes gases sobre a parede

de gesso e o alumínio em estado líquido durante o seu resfriamento até estado sólido resultando no comportamento observado de aumento de rugosidade e defeitos superficiais devido ao aumento de espessura das paredes dos moldes. 3.

3 CONCLUSÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho pode-se chegar as seguintes conclusões: Paredes mais delgadas favorecem melhor qualidade do acabamento. Paredes muito finas podem causar problemas durante o processo de modelar o gesso de fundição por falta de resistência necessária.

Ficou claro que é possível utilizar moldes primários produzidos em PLA para produção de moldes de gesso para utilização em fundição de peças de alumínio e com a obtenção de algumas vantagens significativas sobre a atual tecnologia de moldes em poliestireno expandido:

A) Não há a necessidade de um artesão treinado para esculpir os moldes primários, bastando um profissional habilitado para trabalhar com desenho 3D;

B) Formas extremamente complexas podem ser reproduzidas com baixo custo de tempo, energia e de materiais.

C) A qualidade superficial das peças produzidas com moldes de parede com 0,60 mm apresentaram qualidade superficial superior as peças produzidas com moldes primários de madeira ou poliestireno expandido.

Dentro de todos estes fatores talvez o mais impactante seja a possibilidade de obter peças de alta complexidade geométrica por fundição tradicional e com baixo custo, principalmente no que diz respeito ao tempo de produção, o que habilita esta tecnologia para aplicações em prototipagem rápida em metais e produção de pequenas peças em massa.

REFERÊNCIAS

BAJA SAE BRASIL. Disponível em: <http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>. Acesso em 27 jun. 2019.

BALDAM, Roquemar de Lima. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Érica, 2013.

CUNICO, Marlon Wesley Machado. **Impressoras 3d**: o novo meio produtivo. Curitiba: concep3d pesquisas científicas Ltda., 2015.

PIPES, A. **Desenho para designers**. São Paulo: Blucher, 2010.

VOLPATO, Neri *et al.* **Prototipagem rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 2014.

VOLPATO, N. *et al.* **Prototipagem rápida**: tecnologia e Aplicações. São Paulo: e. Blucher, 2007.

WICKERT, Jonathan. **Introdução a engenharia mecânica**. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

MODIFICAÇÃO DE UM IMPLEMENTO AGRÍCOLA PARA DISTRIBUIÇÃO DE UREIA COM ENXADAS ROTATIVAS

Anginaldo Claudino¹
Gustavo Cabral De Medeiros²
Rodolfo Lucas Bortoluzzi³
Derek Manoel Luup Carvalho⁴

Resumo: Estima-se que a população mundial aumente aproximadamente 9 bilhões de pessoas até 2050, sendo assim a necessidade de se produzir mais alimentos deverá aumentar em torno de 70%. Com isso pelo menos 7,0 milhões de hectares deverão ser acrescentados para o uso agrícola entre os anos de 2015 a 2025, em que áreas com potencial agrícola poderão ser exploradas. O presente trabalho contempla o projeto detalhado e a construção do protótipo de uma adubadora com duas linhas para agricultura familiar. Desafiado pelas componentes curriculares de projetos I e projetos II, onde deveríamos projetar meios de facilitar as tarefas do dia-a-dia, e ao grande interesse na área agrícola. Observou-se a necessidade de desenvolver um equipamento que se adequasse às características deste produtor, com baixo nível de mecanização da agricultura Familiar, substituindo o sistema de adubação manual, lento e desgastante por um sistema mecanizado e mais eficiente, permitindo além do plantio também a adubação.

Palavras-chave: Implemento agrícola. Adubadora. Agricultura familiar.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura familiar vem aumentando sua produção

¹ E-mail: anginaldoclaudino@hotmail.com.

² E-mail: gustavo_cabral@hotmail.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

⁴ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

consideravelmente na última década. Segundo dados do Censo Agropecuário de 2006, 84,4% do total dos estabelecimentos agropecuários brasileiros pertencem a grupos familiares. São aproximadamente 4,4 milhões de estabelecimentos, sendo que a metade deles está na região nordeste.

De acordo com o estudo, ela constitui a base econômica de 90% dos municípios brasileiros com até 20 mil habitantes; responde por 35% do produto interno bruto nacional; e absorve 40% da população economicamente ativa do país.

Devido ao grande crescimento populacional, o foco da agricultura está voltado para a produção de alimentos, o que fez a mecanização agrícola estar em grande ascendência não só no Brasil como no mundo. O crescimento da mecanização agrícola é muito visível em grandes produtores de grãos (soja, milho, trigo, etc.), pelo fato de plantarem grandes extensões de terra e o poder aquisitivo ser maior. (Censo agropecuário 2006/2017) (acesso em 20/02/2019).

Hoje no Brasil estamos vivendo um momento, onde os incentivos estão voltados para a agricultura familiar, não sendo visada a monocultura, pelo fato de as áreas serem pequenas a rentabilidade não seria suficiente para manter o produtor no campo. O enfoque está, portanto, no cultivo de vários produtos como, por exemplo, milho, feijão, verduras, legumes, criação de gado leiteiro, galinhas, porcos, etc. com o objetivo de complementar a renda familiar.

Tendo em vista a melhoria da qualidade de vida do homem do campo, que vem se tornando mais prático e menos cansativo, e levando em conta o poder aquisitivo do pequeno produtor, desenvolveu-se no presente trabalho de conclusão de curso, um equipamento de plantio para facilitar a tarefa de plantar o milho (que servirá de alimentação dos animais e abastecimento de mercados).

O produto foi desenvolvido conforme as necessidades do pequeno produtor, levando em conta o poder aquisitivo, a estrutura da pequena propriedade, e a praticidade na sua utilização e manutenção do equipamento. Analisando as

características da pequena propriedade, podemos constatar que a mão-de-obra utilizada é da própria família, composta na maioria das vezes de 3 a 4 pessoas. O trator disponível, geralmente é antigo, muitas vezes sem comando hidráulico, e de potência baixa (50 a 88 CV). A maioria das atividades são desenvolvidas de forma manual, ocasionando um grande desgaste físico. (Biblioteca.ibge.gov.br/2017) (acesso em 17/02/2019).

A revisão bibliográfica abordada neste Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo apresentar os conceitos básicos sobre planejamento de experimentos bem como informações que permitam a fabricação de um implemento agrícola que será utilizado nesta pesquisa.

A solução de um problema ou o desenvolvimento de um produto ou processo pode ser feita de várias maneiras, tais como: tentativa e erro, variar um fator de cada vez, aproximações sucessivas, ou através de metodologias com base na estatística. Essas experiências podem ser empregadas para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura, diferentes conceitos de produto, entender a influência de determinados fatores, etc.

Torna-se cada vez mais importante o emprego de experimentos durante todas as etapas do ciclo de vida do produto, sendo que experiências planejadas são criadas para responder questões específicas com um rigor estatístico, experimentos com poucos dados não irão produzir um resultado com boa confiabilidade. (Button, 2005) (acesso em 09/05/2019).

Neste trabalho foram utilizados processos experimentais para o desenvolvimento de um protótipo de uma adubadora de milho, as pesquisas experimentais serão realizadas na propriedade do senhor Márcio Lourenço de Medeiros, além disso, foram feitas pesquisas bibliográficas para conhecer o estado da arte sobre o tema.

Foi desenvolvido um implemento agrícola com capacidade de distribuir e aterrar ureia no solo, visando a diminuição do processo de adubação de três para um, e a dependência das condições climática adequadas para o

trabalho, reduzindo o risco de danificar a plantação e também a perda do adubo, com a pesquisa bibliográfica foram levantadas informações de modelos e características das máquinas distribuidoras de fertilizantes no mercado agrícola de Santa Catarina.

Além disso foram definidos os requisitos do projeto em desenvolvimento para a máquina distribuidora. Estes requisitos foram detalhados em um que atende questões de segurança, desempenho, manutenção e satisfação, de acordo com as especificações do modelo experimental projetado.

1.1 FAMILIAR

A Lei 11.326 de julho de 2006 define as diretrizes para formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e os critérios para identificação desse público. Segundo dados do Censo Agropecuário de 2006, 84,4% do total dos estabelecimentos agropecuários brasileiros pertencem a grupos familiares. São aproximadamente 4,4 milhões de estabelecimentos, sendo que a metade deles está na Região Nordeste.

De acordo com o estudo, ela constitui a base econômica de 90% dos municípios brasileiros com até 20 mil habitantes; responde por 35% do produto interno bruto nacional; e absorve 40% da população economicamente ativa do país. Ainda segundo o Censo, a agricultura familiar produz 87% da mandioca, 70% do feijão, 46% do milho, 38% do café, 34% do arroz e 21% do trigo do Brasil. Na pecuária, é responsável por 60% da produção de leite, além de 59% do rebanho suíno, 50% das aves e 30% dos bovinos do país. (Embrapa) (acesso em 03/04/2019).

1.2 MILHO

Figura 1 – Milho



Fonte: Do Autor.

Como podemos ver na figura 1 este é o porte ideal entre nove e doze folhas para a adubação com ureia, para que o possa se desenvolver corretamente e alcançar uma granulometria correta para um melhor aproveitamento de todo plantio, tanto na forma de alimento humano quanto para silagem.

“O milho é a forragem mais tradicional por apresentar condições ideais para a produção de uma boa silagem, como o teor de matéria seca por ocasião do produto final entre 30% e 35%, mais de 3% de carboidratos solúveis na matéria original. No passado, as tecnologias recomendadas para a produção de milho para silagem visavam basicamente a produção de massa verde, posteriormente, a qualidade da silagem passou a ser avaliada somente através da porcentagem de grãos na matéria seca. Isto foi atribuído devido ao grande número de trabalhos desenvolvidos até a década de 1970, demonstrando que os grãos de milho são mais digestíveis do que as folhas e hastes da planta e, desta forma, aumentando-se sua proporção na silagem.” (Embrapa) (acesso em 03/04/2019).

1.3 SILAGEM

Figura 2 - Silagem de milho



Fonte: Do Autor.

A figura 2 demonstra a silagem sendo preparada para ser coberta antes do processo de fermentação, para que possa ter um bom valor nutritivo para alimentação do gado durante o inverno onde as pastagens ficam escassas e também no processo de confinamento para engorda.

“A silagem de milho é hoje o tipo de silagem mais usado no Brasil. Isso acontece principalmente porque ela consegue fornecer forragem com muita energia e proteína para o gado e tem um cultivo mais fácil que outras culturas agrícolas. Controlando a lavoura de forma correta, teremos um alimento mais rico e que nutre melhor o gado. Essa melhor nutrição influencia diretamente na produção de leite e no processo de engorda. Estudos mostram que o melhor momento para colheita do milho para silagem é quando a porcentagem de Matéria Seca (MS) da forrageira é de 30% a 35%. Isso acontece porque o grão nesse estágio tem o melhor balanço ideal de energia e proteína, além de ser mais facilmente compactado.” (Embrapa) (acesso em 03/04/2019).

1.4 ADUBADORAS

Figura 3 – Adubadora



Fonte: cuiket.com.br.

Dependendo da maneira a ser utilizada no processo de distribuição de adubo, a máquina adubadora pode ser dividida em adubadora por gravidade e adubadora a lanço, adubadora por gravidade é uma máquina com depósito geralmente de formato trapezoidal, cuja largura de deposição normalmente corresponde à largura do depósito, sendo o adubo distribuído ao solo por gravidade, e que, a adubadora a lanço é um tipo de máquina, na qual o adubo é centrifugado para execução desta tarefa, sua largura de distribuição é muito maior que a largura da máquina.

Adubadora em linha: Como mostra a figura 3 é uma máquina agrícola constituída de órgãos responsáveis pela abertura das saídas de adubo no solo, também responsáveis pelo fechamento.

Adubadora em linha tem um mecanismo cuja função é controlar a dosagem da quantidade de adubo a ser depositado no solo, este mecanismo é chamado de dosador de adubo e existe diferentes tipos,

- “a) Eixo com paletas: eixo localizado na parte inferior do depósito de adubo, tem tamanho igual à largura do depósito. b) Rosca sem fim: semelhante ao anterior, mas seu eixo apresenta na superfície uma espécie de helicóide.

c) Fundo giratório: adaptam-se a adubadoras que apresentam depósitos de adubo individuais. d) Roseta: mecanismo compostos de uma série discos horizontais, uma para cada linha de semeadura, que apresentam na sua extremidade vários ressaltos. Figura 3 – Adubara (Fonte cuiKET.com.br). 7 e) Dosador helicoidal para adubos: tem um parafuso colocado sob o depósito de adubo, sendo a quantidade deste variada de um sistema de transmissão por engrenagens. f) Dosador de rotor dentado para adubo: foram os primeiros a surgir, o rotor recebe o movimento de rotação a partir de um eixo único, que recebe o movimento de rotação das rodas de sustentação da máquina, transmitindo essa rotação ao rotor dosador. g) Dosador de adubos de correia ou correntes: constituem-se de uma correia ou corrente que trabalham sob o fundo do depósito de adubo, dosando a quantidade de material a ser aplicada pelo transporte através de uma janela de abertura regulável. h) Dosador de adubos de cilindros canelados: tem uma esteira com sulcos que transportam em massa, conduzindo o fertilizante até os discos de distribuição.” (Eduardo Fiorin flores) (acesso em 25/05/2019).

1.5 ADUBAÇÃO

A primeira coisa que se pensa quando se fala em agricultura é a adubação, nada mais é do que a adição de compostos fertilizantes a uma cultura, que tem como objetivo corrigir, conservar ou recuperar a fertilidade do solo, disponibilizando nutrientes para as plantas de modo que esta obtenha melhor desenvolvimento, resumidamente adubação é repor os nutrientes que estão em falta no solo para a planta, assim como nós nos nutrimos por meio de alimentos. (Embrapa) (acesso em o 25/05/2019).

1.6 UREIA

A ureia fertilizante contém 46% de nitrogênio e solúvel em água, álcool e benzina, as transformações que sofre no solo são semelhantes àquelas pelas quais passam outras fontes orgânicas de Nitrogênio, inclusive a própria matéria orgânica. A ureia é, pois, um adubo orgânico feito pelo homem,

quimicamente idêntico ao produzido pelos animais, e que vem sendo usado na agricultura, sem nenhum risco para o homem nem para o meio ambiente. Com o uso da ureia, a “Agricultura orgânica” seria mais eficiente e saudável, pelo menos no que diz respeito à adubação nitrogenada. (Embrapa) (acesso em 25/05/2019).

1.7 ADUBO ORGÂNICO

A adubação orgânica é um processo mais demorado. Tanto em sua fabricação quanto em sua aplicação. O tempo de decomposição do adubo para liberar os nutrientes é alto e não é possível dimensionar exatamente o quanto de adubo deverá ser colocado para suprir as necessidades específicas de um cultivo. Existe também o risco de contaminação do solo se houver agentes infecciosos nas fezes dos animais ou nos demais resíduos utilizados para a produção do adubo orgânico. (Wordpress) (acesso em 25/05/2019).

1.8 IMPLEMENTOS

São as máquinas não motoras, ou seja, aquelas que não são capazes de transformar, mas simplesmente transmitir o efeito de força. Como exemplos de implementos podemos citar o arado, a grade, o subsolador, os perfuradores de solo etc. Atualmente são usados vários meios de acelerar ou até mesmo facilitar os processos de plantio e colheita, porém há muitos implementos que necessitariam de mudanças e/ou ajustes, ou que apresentam algumas limitações.

1.9 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO USO DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS NO CAMPO

Observou-se nos textos selecionados para estudo as vantagens e desvantagens do uso de implementos no campo, a partir dos quais construiu-se o Quadro 1:

Quadro 1 - Vantagens e Desvantagens no Uso de Implementos Agrícolas

Vantagens	Desvantagens
Atendimento da demanda atual	Compactação do solo (maquinário mais pesado)
Atendimento da demanda futura	Redução da mão de obra
Redução de custos de produção	Alto preço na aquisição de maquinário
Aumento da produção	Requer operadores especializados
Eficiência e eficácia da produção	Despesas com lubrificantes / combustíveis
Expansão da fronteira agrícola	Necessidade de assistência técnica especializada nas proximidades

Fonte: Rafael Diego, 2017.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto foi realizado por meio de pesquisa bibliográfica. Este tipo de pesquisa é o primeiro procedimento em qualquer tipo de trabalho científico ou projeto, pois busca o aporte conceitual necessário para expor o tema, fundamentando o estudo teoricamente, justificando os seus limites, (MARKONI; LAKATOS, 2014) (acesso em 10/03/2019), para iniciar o estudo recorreu-se a leitura inicial do material previamente selecionado. Esta leitura auxilia na seleção do material necessário pois é a “captação da tendência geral, sem entrar em detalhes, valendo-se dos títulos, subtítulos, ilustrações. (MACEDO, 1994) (acesso em 10/03/2019). Este estudo foi construído seguindo as etapas, que vão deste a busca do material ao seu tratamento analítico, isto é, análise das publicações selecionadas.

A metodologia para o desenvolvimento do projeto está descrita detalhadamente, onde a presente técnica foi utilizada com o intuito de amenizar a tarefa do plantio do milho, conforme descrito em conversas, com produtor deste ramo de atividade da agricultura familiar. (VALDIERO 1997) (acesso em 07/05/2019), a metodologia baseia-se em pesquisas bibliográficas e experimentais.

2.1 AÇO SAE 1020 PARA ESTRUTURA

O aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais comum utilizado como aço para cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços mais ligados para o mesmo propósito. Possui excelente plasticidade e soldabilidade. Aplicações dos aços SAE 1020, é utilizado em componentes mecânicos de uso como engrenagens, eixos, virabrequins, eixos-comando, pinos guia, anéis de engrenagem, colunas, catracas, capas. Aços SAE 1020 são aços de boa soldabilidade, boa forjabilidade, baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade. (Açosporte) (acesso em 30/05/2019).

2.2 AÇO SAE 1045 PARA EIXOS

Este aço SAE 1045 possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura, o aço SAE 1045 é utilizado em geral, com durezas de 180 a 300 HB, sendo utilizado para fabricação de componentes de uso geral onde seja necessária uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencional. (Açosporte) (acesso em 30/05/2019).

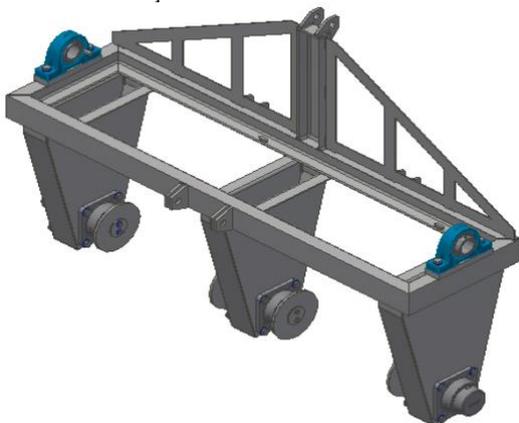
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como principal resultado deste estudo foi produzido um protótipo digital com base em modelos já disponíveis de outros implementos agrícolas do mercado. No entanto nenhum destes implementos permite a tripla função de carpir, adubar com ureia e enterrar a ureia dispensada pelo equipamento. Desta forma a proposta em tela visa facilitar o dia a dia dos pequenos produtores rurais com um equipamento de fácil uso e com versatilidade de funções.

3.1 PROTÓTIPO DIGITAL

Nesse protótipo digital foi desenvolvido um implemento agrícola com a capacidade de diminuição dos processos de carpir, colocar ureia e aterrar, em apenas um único processo. Como mostra a figura 4.

Figura 4 – Estrutura principal do implemento agrícola que servirá de sustentação dos silos de distribuição de ureia e também das enxadas rotativas



Fonte: Do Autor.

A estrutura principal da adubadora foi fabricada com perfil U aço SAE1020, no centro da estrutura existe um eixo ligado a uma caixa de redução de 20:1 acoplada no trator que gera a rotação com frequência de 540 rpm, o eixo foi fixado na pontas com rolamentos, como mostra a figura 4. Neste mesmo eixo foram acoplamos três engrenagens responsáveis por movimentar as enxadas rotativas, que ficam na base da estrutura.

Para movimentar as enxadas foi feito um eixo e dois mancais que sustentam três enxadas cada, movimentadas por uma engrenagem ligada por meio de uma corrente a engrenagem no eixo superior.

Figura 5 - Corpo do distribuidor com silos que armazenam a ureia para a adubação



Fonte: Do Autor.

A frente do eixo principal foi colocada dois dosadores para da distribuição controlada da ureia, com silos de capacidade de 50L cada, como mostra a figura 5, que serão acionados por meio de uma corrente ligada a uma roda, que serve de start e stop.

Figura 6 - Rosca sem fim superior. (Fonte Tatu).



Fonte: Tatu.

Rosca sem fim é usada com o movimento de empurrar a ureia para ser distribuída uniformemente durante o processo de adubação. A figura 6 mostra as roscas sem fim utilizadas neste implemento, que são responsáveis pela dosagem correta da ureia uniformemente na plantação de milho, durante o processo de adubação.

Figura 7 - Roda de acionamento para a distribuição de ureia, movida pela força motriz quando acionado o hidráulico do trator



Fonte: Do Autor.

A figura 7 mostra a roda responsável pela distribuição da ureia, quando acionado o hidráulico do trator para baixo a roda encosta no chão movimentando o eixo que gira as roscas que são responsáveis por dosar a ureia distribuindo a mesma quantidade por toda a plantação, caso seja necessário parar a adubação ou fazer o retorno, essa distribuição será cessada através de novo acionamento do hidráulico do trator, desta vez no sentido de levantar a roda do chão fazendo todo mecanismo parar.

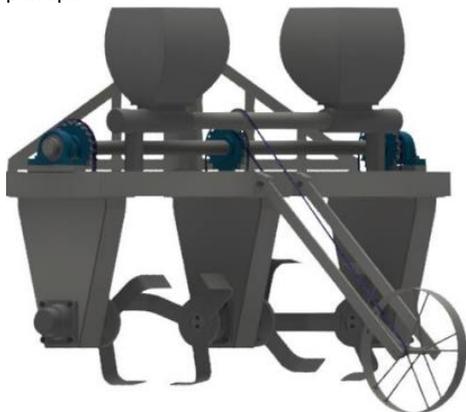
Figura 8 – Visão frontal do implemento



Fonte: Do Autor.

A figura 8 demonstra os três pontos de sustentação do implemento que servirá para a acoplagem no trator, soldados em uma treliça para reforço da estrutura principal.

Figura 9 – Visão posterior mostra todos os componentes já instalados na estrutura principal



Fonte: Do Autor.

A figura 9 demonstra com clareza todos os componentes citados nas figuras anteriores já instalados na estrutura principal do implemento, pode-se ver os silos, enxadas e a roda responsável por movimentar as roscas responsáveis pela distribuição da ureia.

3.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO

Com base no protótipo digital apresentado no item 3.1 foi realizado um levantamento dos custos de materiais necessários para a produção de um equipamento físico com base no projeto.

Quadro 2 - Recursos utilizados para construção do implemento agrícola

Materiais	Quantidade	Valor \$
Aço 1020 viga U nº 10,16x4,02cm	6 metros	R\$: 250,00
Rolamentos	10 unidades	R\$: 250,00
Correntes	4 metros	R\$: 400,00
Enxadas	12 unidades	R\$: 250,00

Eixos	6 unidades	R\$: 200,00
Óleo	8 litros	R\$: 30,00
Caixa de redução	1 unidade	R\$: 1.000
Roda	1 unidade	R\$: 100,00
Silos	2 unidades	R\$: 100,00
Rosca sem fim	2 unidades	R\$: 50,00
Parafusos	40 unidades	R\$: 50,00
Eletrodos	5 kg	R\$: 100,00
Tinta	3,6 kg	R\$: 40,00
Mola	1 unidade	R\$: 20,00
Mão de obra	1 pessoa	R\$: 1.160,00
Totais		R\$: 4.000,00

Fonte: Do Autor.

O quadro 2 mostras em detalhes os materiais e seus respectivos valores que foram utilizadas para a fabricação do implemento agrícola, portanto serve como uma estimativa do preço de aquisição do equipamento pronto para uso por um produtor rural.

Quadro 3 - Levantamento de custos para aquisição de implementos já disponíveis no mercado rural

Produto	Quantidade	Valor \$
Cultivadora duas linhas	1 unidade	R\$: 6,000
Distribuidor de adubo	1 unidade	R\$: 5,500
Aterrador duas linhas	1 unidade	R\$: 7,000
Total	3 unidades	R\$: 18,500

Fonte: Do Autor.

No quadro 3 mostra os valores que seriam gastos na aquisição de implementos que já existem no mercado rural atualmente, para as três etapas do plantio e adubação do milho.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho, teve como proposta a elaboração de um projeto conceitual de um implemento agrícola, que visa acelerar o processo de adubação após o plantio do milho, foi realizado um estudo bibliográfico sobre os processos de plantio o que facilitou o processo de desenvolvimento do protótipo digital.

O trabalho atingiu seus objetivos, pois de uma maneira simplificada, englobou os problemas existentes durante o processo de adubação após o plantio, melhorando a utilização do tempo para uma correta adubação do solo, trazendo desta forma, uma possibilidade viável de garantir uma adubação adequada, garantindo um bom aproveitamento de condições climáticas e do solo, assim, foi possível desenvolver um conceito que atendesse as necessidades exigidas e que acelera-se o processo de adubação, o que não é nos sistemas atuais, onde muitos produtores passam certa dificuldade.

Realizando o projeto conceitual, e abordando de uma forma geral toda a metodologia para o desenvolvimento do projeto, notou-se a grandeza e a complexidade de se realizar o desenvolvimento de um produto, partindo-se das necessidades dos pequenos agricultores, mas sem esquecer o envolvimento de outras pessoas, como projetistas, mecânicos e operadores, pois todas as informações obtidas com as mesmas foram de grande importância para se obter um conceito do produto final, para que o mesmo possa atingir as expectativas.

Assim, a realização deste projeto possibilitou um grande aperfeiçoamento profissional, pois foi possível aprender e pôr em prática os ensinamentos da engenharia mecânica.

REFERÊNCIAS

AÇOSPORTE. **Aço sae 1020 e 1045**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Açosporte. Comercial de Aços Ltda. Disponível em: <http://www.acosporte.com.br/>. Acesso em: 30 mai. 2019.

ALONÇO, Airton dos Santos. **Metodologia de projeto para a concepção de máquinas agrícolas seguras**. 2004. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, disponível em: <http://nedip.ufsc.br/> Acesso em: 20 fev. 2019.

DIEGO, Rafael. **Qual é a vantagem da agricultura de precisão**. 2017. TCC (Graduação). Disponível em: senar.org.br. Acesso em: 15 mar.2019.

EMBRAPA. **Recomendações básicas para a aplicação das boas práticas agropecuárias e de fabricação na agricultura familiar**. 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 03 abr.2019.

FLORES, Eduardo Fiorin. **Análise de máquinas agrícolas distribuidoras de fertilizantes**. 2008. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Disponível em: repositorio.ufsm.br. Acesso em: 15 mar. 2019.

GESPIANOS. **Adubação orgânica, vantagens e desvantagens**. 2016. Publicado em 28 jun. 2016 Disponível em: gespianos.wordpress.com. Acesso em: 25 mai.2019.

GROSSI, Mauro del. **Agricultura familiar e o censo agropecuário**. Brasília: Universidade de Brasília - UNB, 2018. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/>. Aceso em: 20 fev. 2019.

IBGE. **Censo agropecuário de 2017**. 2017. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 fev. 2019.

MAGRO, Tais Vieira; CAVICHIOLO, Fábio Alexandre. **Implementos agrícolas**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Fatec – Taquaritinga – São Paulo. Disponível em: simtec.fatectq.edu.br. Acesso em: 23 fev 2019.

PELINSON, Jean Carlo. **Desenvolvimento de implemento agrícola para manipulação de big bag no campo**. 2016.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/>. Acesso em: 10 fev.2019.

ROYAL. **Maquinas e ferramentas**. 2018. Artigos de produção rural. Disponível em: <https://www.royalmaquinas.Com.Br>. Acesso em: 01 jan. 2019.

SCHULZ, Rodrigo Ermo Hess. **Projeto detalhado e construção do protótipo de uma semeadora-adubadora de uma linha para agricultura familiar**. 2010. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Detec – Departamento de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica. Campus Panambi, Disponível em: bibliodigital.unijui.edu.br. Acesso em: 05 mar. 2019.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE LIGAS FUNDIDAS DE ALUMÍNIO A206.0 E A356 PARA APLICAÇÃO EM MANGA DE EIXO DE UM VEÍCULO BAJA SAE

Maicon Medeiros Mendes¹
Rodolfo Lucas Bortoluzi²
Derek Manoel Luup Carvalho³

Resumo: Considerando os diversos benefícios na utilização do alumínio, o presente artigo relata a análise comparativa entre as ligas de alumínio fundido A206.0 e A356, utilizadas na fabricação da manga de eixo de um veículo Baja SAE. O comparativo foi realizado através de processo de tratamento térmico por solubilização e envelhecimento natural, com a finalidade de alterar as propriedades mecânicas das ligas e proporcionar aumento de desempenho. Realizou-se um estudo do comportamento dinâmico que um sistema de suspensão veicular está submetido, para conhecimento dos esforços e emprego na simulação computacional, identificando as tensões e fatores de segurança aplicados na manga de eixo de um veículo. Para a comprovação da eficiência das ligas de alumínio A206.0 e A356, foram realizados ensaios mecânicos de dureza e tração, bem como análises micrográficas, para identificação de mudanças estruturais. Constatou-se que a liga A206.0 apresenta resistência superior de 32,40% quando comparados aos resultados da simulação computacional, caracterizando esta liga como material mais adequado na fabricação da manga de eixo do veículo Baja SAE.

Palavras-chave: Alumínio fundido. Manga de eixo. Tratamento térmico. Baja SAE. A206.0, A356.

¹ E-mail: maiconmmendes@hotmail.com.

² E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

O constante aumento da utilização do alumínio em aplicações automotivas é uma tendência mundial. Usado em diversos componentes, o alumínio melhora a segurança, o desempenho, diminui o consumo energético dos automóveis e a emissão de poluentes.

Hoje o setor de transporte destaca-se como o maior consumidor de alumínio no mundo e o material vêm se tornando uma solução eficiente para o segmento. Diminuir o peso estrutural dos veículos, ou manter seu peso em razão dos adicionais recursos tecnológicos é um desafio constante da Indústria Automotiva e de Transportes (FILLETI, 2010).

Desta forma, aplicações fabricadas com o alumínio, podem chegar a uma redução de 50% da massa e a uma resistência superior quando comparadas a uma mesma peça fabricada em aço (AKASHI, 2013).

Considerando os diversos benefícios na utilização do alumínio, vimos através de um estudo mais aprofundado, partindo da análise e testes experimentais, apresentar resultados obtidos pelos comparativos entre as ligas fundidas de alumínio A356 e A206, empregadas na fabricação de mangas de eixo de um veículo Baja SAE (Society of Automotive Engineers).

A SAE mantém programas que lançam desafios aos educandos de engenharia, com o objetivo de buscarem soluções para uma aplicação prática do conhecimento acadêmico. Um destes desafios é o Baja SAE, onde os estudantes devem construir um veículo monoposto offroad seguindo um regulamento específico, que deve ser submetido à análise estática, dinâmica e de projeto.

O comparativo permitiu identificar dentre os materiais ensaiados, aquele que apresente as melhores características e que atendam requisitos estipulados para utilização no Baja SAE da equipe FucapRoad.

2 REVISÃO LITERÁRIA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio (Al) sendo o terceiro elemento mais abundante na Terra possui massa específica de $2,7 \text{ g/cm}^3$, o aço como comparação possui $7,87 \text{ g/cm}^3$. Em sua forma pura o alumínio possui uma baixa resistência mecânica, mas suas ligas podem ser até 30 vezes mais resistentes quando aplicado processo de endurecimento por tratamento térmico. Embora possua uma resistência de tração inferior a do aço, a resistência específica do alumínio é excelente. A resistência específica leva em consideração a razão entre resistência mecânica e o peso específico (ASKELAND; PHULÉ, 2011).

Os efeitos dos mecanismos de endurecimento no alumínio e suas ligas podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1 - Efeito dos mecanismos de endurecimento no alumínio e suas ligas

Material	Limite de resistência a tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Razão entre limite de escoamento da liga e do Al puro
Al puro	45	17	60	1
Al comercial puro Pureza mínima 99%	90	34	45	2,0
Liga de Al endurecida por solução sólida	110	41	35	2,4
Al trabalhada a frio	165	152	15	8,8
Liga de Al endurecida por dispersão	290	152	35	8,8
Liga de Al endurecida por envelhecimento	572	503	11	29,2

Fonte: ASKELAND; PHULÉ, p. 423, 2011.

Segundo Smith e Hashemi (2012), existem inúmeras ligas de alumínio que oferecem boas propriedades mecânicas, desta forma, as ligas de alumínio se classificam em dois grupos: as ligas para trabalho mecânico ou trabalhada e as ligas de fundição, estas ainda, subdivididas em tratáveis

termicamente e não tratáveis termicamente. Enquadra-se no primeiro grupo o material que pode ser trabalhado mecanicamente, suportando deformações plásticas, trabalhadas a quente e a frio pelos processos de trefilação, extrusão, laminação, forjamento, entre outros.

As ligas para fundição exigem extremo cuidado com relação aos agentes contaminantes do metal. As composições minoritárias que compõe as ligas podem apresentar benefícios para algumas ligas e ser prejudiciais a outras, sendo assim é necessário o devido controle quanto ao percentual de cada elemento que compõe as ligas.

Desta forma o controle percentual de cada agente vai garantir a melhoria das propriedades relacionadas à fluidez, resistência mecânica, ductilidade ou resistência a corrosão (SMITH; HASHEMI, 2012).

Conforme Askeland e Phulé (2011), as ligas Al-Si compostas por alumínio-silício são muito utilizadas entre as ligas de alumínio fundidas, especialmente por sua alta fluidez, baixa contração nos fundidos, elevada resistência à corrosão, baixo coeficiente de expansão térmica e possuem boa soldabilidade. A microestrutura dessas ligas consiste de uma fase primária de alumínio ou de silício e de uma fase eutética composta por esses dois elementos.

A classificação das ligas de alumínio e seus elementos de liga prioritários podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 - Classificação das ligas de alumínio

Ligas de fundição		
1xx.x ^b	Al comercialmente puro (> 99% Al)	Não endurecível por envelhecimento
2xx.x	Al-Cu	Endurecível por envelhecimento
3xx.x	Al-Si-Cu ou Al-Si-Mg	Algumas são endurecível por envelhecimento
4xx.x	Al-Si	Não endurecível por envelhecimento
5xx.x	Al-Mg	Não endurecível por envelhecimento
7xx.x	Al-Mg-Zn	Endurecível por envelhecimento
8xx.x	Al-Sn	Endurecível por envelhecimento
9xx.x	Não utilizada atualmente	

a: O primeiro dígito indica o elemento de liga principal, o segundo indica a modificação, e os dois últimos, o decimal de concentração percentual de Al. Exemplo 1060 indica liga com 99,6% de Al.

b: O último dígito indica a forma do produto solidificado, os dígitos 1 e 2 indicam lingote (depende do grau de dureza) e 0, uma peça fundida.

Fonte: ASKELAND; PHULÉ, p. 424, 2011.

2.1.1 Liga 356 Alumínio-Silício

As ligas de alumínio da série 3xx incluem mais de 50 variações (319, 356, 357, 380, etc.). Algumas destas ligas individuais têm múltiplas derivações, todas usando o mesmo número de três dígitos. Estas derivações da liga incluem um registro antes da nomenclatura de três dígitos. Exemplos de derivações das 356 são: A356, B356, C356 e F356 (ALAM; ANSARI, 2017).

Segundo Kaufman e Rooy (2004), as derivações das ligas série 3xx para fundição se deve a adição de magnésio às ligas de alumínio-silício, estes elementos combinados geram excelentes características de escoamento e propriedades mecânicas notáveis quando tratadas termicamente. Além dessas características, essa liga possui ótima resistência à corrosão, o que a torna de grande viabilidade a fundição de peças em moldes de areia.

Conforme Major e Hartlieb (2009), a adição de uma pequena quantidade de Cu (cobre) reforça a matriz da liga A356 sem o efeito de perda de ductilidade. O Mn (manganês) e Zr (zircônio) agem para formar dispersóides altamente

estáveis que têm pouco efeito sobre as propriedades mecânicas a baixas temperaturas, melhorando a resistência a fluência terciária, a 300°C. Na Tabela 3 é possível visualizar o percentual em peso dos principais elementos que compõem a liga 356.

Tabela 3 - Composição Liga 356 (ASTM B85)

Elementos químicos	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	Outras
Liga 356 com adição de 0,5%Cu	6,5 a 7,5	0,60	0,25	0,35	0,20 a 0,45	0,35	0,25	0,15

Fonte: KAUFMAN; ROOY, p.10, 2004.

2.1.2 Liga 206.0 Alumínio-Cobre

Segundo Major e Hartlieb (2009) há uma limitação para o ganho das propriedades mecânicas das ligas fundidas da série 3xx. Se o objetivo for um rendimento superior ou a substituição de metais dúcteis como o ferro, a utilização de ligas fundidas da série 2xx se torna uma excelente alternativa.

Conforme Fasoyinu, Weiss e Shah (2014), a A206 está entre as ligas com maior resistência mecânica principalmente com o endurecimento por processo térmico T7, possui excelentes propriedades em altas temperaturas, com baixa perda de eficiência até 177°C, sendo muito indicada para aplicações em componentes para motores. Tem um melhor aproveitamento quando vazado em molde de areia, e quando vazado em moldes permanentes podem ocorrer trincas devido a contração térmica ao final da fase de solidificação.

Em razão da baixa concentração de Si (silício) em sua composição, a liga A206 possui baixa fluidez quando comparada a série 3xx, isso dificulta sua utilização em moldes com geometria complexa de modo a garantir o preenchimento do molde por completo. Hoje este problema é resolvido com a utilização de ferramentas para modelagem de solidificação (MAJOR; HARTLIEB, 2009).

A série 2xx requer um controle dos componentes

químicos mais apurados quando comparados a série 3xx. Os níveis de Fe (ferro) e Si (silício) necessitam estar em níveis mínimos, não sendo superiores a 0,1% e 0,05% respectivamente para garantir as propriedades mecânicas esperadas. Controles e limpeza nos processos são importantes para minimizar mudanças na química e também essenciais para evitar o comprometimento da liga (FASOYINU; WEISS e SHAH, 2014). A tabela 4 representa a composição básica para a liga de alumínio A206.0.

Tabela 4 - Composição Liga A206

Elementos químicos	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	Outras
Liga A206.0	0,05	0,10	4,2	0,20	0,15	0,10	0,15	0,15
Modificada			a	a	a		a	
T7			5,0	0,50	0,35		0,30	

Fonte: (MAJOR; HARLIEB, p. 46, 2009).

2.2 FUNDIÇÃO EM MOLDE DE AREIA

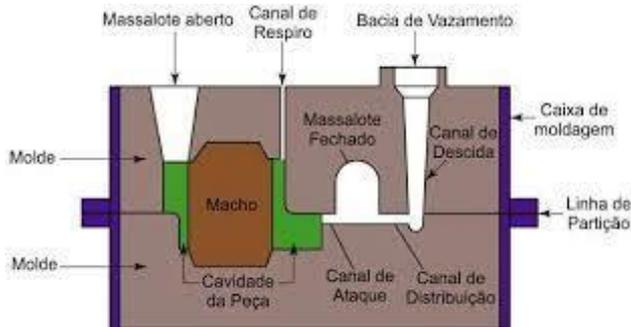
A moldagem de uma peça por meio da impressão geométrica desejada em areia é chamada de fundição em areia, podendo utilizar areia verde ou areia seca como matéria prima principal. Na areia verde é agregada argila e água, já para areia seca se utiliza resina, óleo ou outros agentes de liga para dar resistência ao molde.

O molde em areia deve assegurar duas condições principais: deve possuir resistência suficiente para manter a forma da peça durante o processo, e garantir a saída dos gases formados enquanto o metal fundido é despejado (KAUFMAN; ROOY, 2004).

Para garantir o preenchimento pleno do interior do molde há a necessidade de cavidades para que os gases gerados pelo processo sejam expelidos, caso contrário, podem gerar porosidades na estrutura. Já os massalotes vão garantir que haja material suficiente durante a fase de solidificação prevenindo a formação de rechupes devido a contração

térmica (CHIAVERINI, 1986). A figura 1 apresenta a representação de um molde de areia e seus principais componentes.

Figura 1 - Representação de molde de areia e componentes



Fonte: USP, p. 3, 2019.

2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Segundo Kaufman e Rooy (2004), os tratamentos térmicos para as ligas de alumínio tem uma designação própria, a letra “T”, que seguido de um numeral determina o tipo de tratamento térmico que a peça foi submetida. A nomenclatura tratamento térmico é usada para expor todas as práticas térmicas destinadas a modificar a estrutura metalúrgica, alterando de maneira controlada as características físicas e mecânicas para que critérios específicos de engenharia sejam atingidos.

Alguns dos objetivos para utilização de tratamento térmico são:

- Aumentar a dureza;
- melhorar a usinabilidade;
- melhorar a resistência ao desgaste;
- aumentar a resistência e/ou produzir as propriedades mecânicas especificadas para uma condição específica de material.

Conforme Smith e Hashemi (2012), basicamente os

tratamentos térmicos se dividem em:

- a) T1 – Envelhecimento natural após tratamento de conformação em temperatura elevada;
- b) T2 – Recozimento;
- c) T3 – Solubilização com trabalho mecânico posterior a frio;
- d) T4 – Solubilização e envelhecimento natural (precipitação à temperatura ambiente);
- e) T5 – Envelhecimento artificial sem solubilização prévia (precipitação artificial);
- f) T6 – Solubilização e envelhecimento artificial;
- g) T7 – Solubilização e seguida de estabilização;
- h) T8 – Solubilização, trabalhado a frio e envelhecimento artificial.

O tratamento T4 tem a capacidade de melhorar a resistência, dureza e ductilidade simultaneamente, mas é utilizado somente em condições muito específicas. A maioria dos tratamentos térmicos sacrificam a resistência e a dureza pela elasticidade, ou desenvolvem resistência e dureza à custa da ductilidade. O aquecimento para a solubilização é feito abaixo da temperatura de início de fusão da liga, sendo em seguida o componente resfriado rapidamente em água. O envelhecimento é natural, ou seja, a precipitação ocorre na temperatura ambiente ao longo do tempo (KAUFMAN; ROOY, 2004).

No T5 o resfriamento ocorre rapidamente dentro do próprio molde e não é realizado o aquecimento para a solubilização. O envelhecimento ocorre em baixa temperatura. Este processo é aplicado especialmente em componentes que operam em elevadas temperaturas (SMITH; HASHEMI, 2012).

Conforme Kaufman e Rooy (2004), no tratamento T7 primeiramente é realizada a solubilização e posteriormente é feito o super-envelhecimento artificial. Este tipo de tratamento é utilizado em componentes onde se deseja estabilizar as propriedades mecânicas. Este processo melhora a ductilidade, estabilidade térmica e resistência à corrosão sob tensão. Nesse processo o tempo e a temperatura de envelhecimento são maiores que os usados no tratamento T6.

2.4 MANGA DE EIXO

Um dos componentes mais importantes do sistema de suspensão para veículos automotores é manga de eixo ou “montante” como também é chamado comumente. O componente aglutina em uma única região, os quatro sistemas responsáveis pelo controle dos movimentos veiculares: sistemas de suspensão, de direção, de freio e de transmissão. Na figura 2, é mostrado um veículo SAE Baja, já no detalhe é apresentada a manga de eixo. O entendimento destes sistemas acoplados é fundamental para análise dinâmica e determinação dos esforços envolvidos.

Figura 2: Veículo SAE Baja Universidade de Illinois em Urbana-Champaign.



Fonte - (Offroad Illini).

2.4.1 Sistemas de suspensão, direção e freio

O sistema de suspensão é responsável por estabelecer a conexão entre a carroceria do veículo e as rodas, possibilitando assim o movimento vertical da roda com a finalidade de compensar as irregularidades da pista de rolamento. Normalmente as rodas dianteiras são direcionais, diferenciando assim os sistemas de suspensão dianteiro e traseiro (JAZAR, 2008).

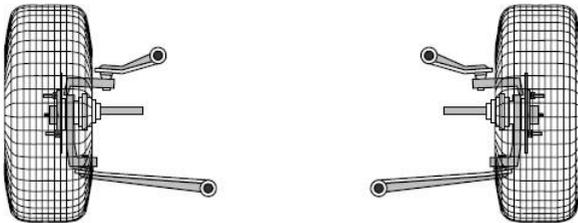
Conforme Gillespie (1992), algumas das funções primárias do sistema de suspensão são:

- Fornecer liberdade vertical, para as rodas poderem

seguir as ondulações da pista, isolando que estas vibrações sejam repassadas para o chassi;

- Resistir ao rolamento do chassi;
- Manter os pneus em contato com a pista com o mínimo de variação nas forças. No sistema de suspensão do Baja SAE da equipe FucapRoad é utilizado o tipo independente, mais especificamente o sistema de suspensão duplo “A” representado na figura 3.

Figura 3 - Representação sistema suspensão duplo “A”.

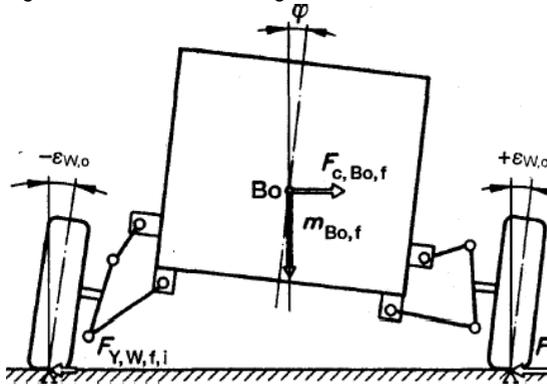


Fonte: (HAZAR, p.471, 2008).

Segundo Reimpell, Stoll e Betzler (2002), as principais vantagens do sistema de suspensão duplo A são suas possibilidades cinemáticas. Como exemplo cita-se a inclinação das rodas em curvas, quando o braço superior for menor, a roda que estiver sendo comprimida, ficará com o camber negativo, isto é, a parte superior da roda tende a ficar inclinada para o centro do veículo, enquanto que a roda do lado oposto, que estará sendo aliviada, ficará com o camber positivo, ou seja, o topo da roda tenderá a ficar inclinada para fora do veículo.

Estas configurações mecânicas do conjunto da suspensão influenciam diretamente nos esforços atuantes no sistema. A figura 4 mostra o comportamento do chassi e rodas com relação ao ângulo de camber.

Figura 4 - Efeitos sobre o ângulo de camber nas rodas



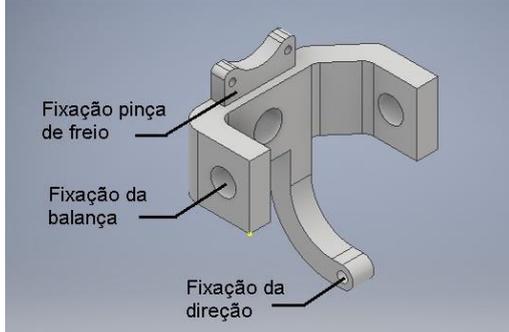
Reimpell; Stoll e Betzle, p.8, 2002).

De acordo com Gillespie (1992), ligado a manga de eixo por uma articulação rotular o sistema de direção de um veículo tem a função de promover o posicionamento das rodas em determinada direção em razão dos comandos realizados no volante pelo motorista.

O sistema de freio tem por finalidade permitir ao condutor, a redução progressiva da velocidade do veículo durante sua operação ou levá-lo a imobilidade. Os sistemas de freios mais usados normalmente em veículos utilizam freios a fricção, podendo esses ser a disco ou tambor.

A figura 5 representa a modelagem da manga de eixo a ser utilizada no Baja SAE da equipe FucapRoad e apresenta a indicação dos pontos onde ocorrem esforços aplicados na peça. No conjunto da manga de eixo dianteira são desconsiderados os esforços do sistema de transmissão, que é aplicado somente na suspensão traseira.

Figura 5 - Projeto manga de eixo FucapRoad Baja SAE.



Fonte: Do Autor.

2.5 CARREGAMENTO, ESFORÇOS E SIMULAÇÕES

A modelagem computacional é utilizada para replicar situações experimentais sem a necessidade de fabricação de um protótipo. Para a correta modelagem na análise, faz-se necessário as determinações das forças que atuam na manga de eixo dianteira.

Gillespie (1992) apresenta um conjunto de equações necessárias para determinar os esforços atuantes no veículo. Estas equações são apresentadas no quadro 1, bem como resultados de momentos e esforços. Os esforços na suspensão são todas as forças de reação do sistema, de forma a manter o equilíbrio com a força vertical transmitida pelo eixo.

A teoria de Von Mises aplicada na análise de tensões apresenta melhores resultados quando comparados com dados experimentais e desse modo, é geralmente o mais utilizado nas validações estruturais. O critério de Von Mises leva em consideração a energia necessária para que ocorra mudança de forma em um elemento ou estrutura, quando submetido a um carregamento multiaxial (BEER et al., 2015).

Para as simulações computacionais o esforço causado nos suportes da suspensão foi utilizado o resultado obtido por Reffatti (2015, p.35) através de ensaio experimental de drop-test. Nesse teste obteve-se um resultado de 763,92 N para um

veículo com massa de 240 Kg, conforme visualizado na tabela 5.

Tabela 5 - Dados ensaio de drop-test

Altura de queda	1 m
Deslocamento do amortecedor-mola (WAM)	73 mm (dado do ensaio <i>Drop-Test</i>)
Distribuição de massa	40% dianteira e 60% traseira
Massa do veículo	240 kg
Tempo de impacto (t_{10})	310 ms (valor estimado via estudo de filmagem)

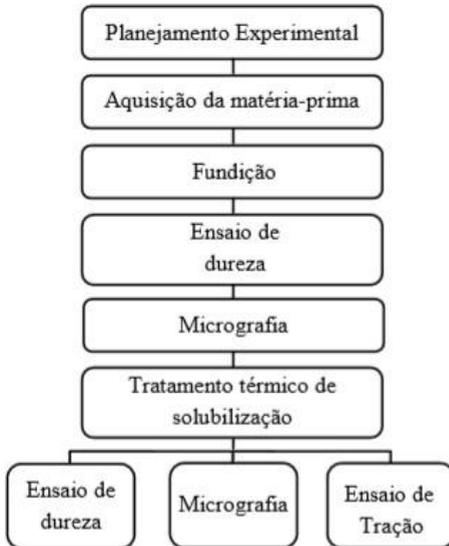
Fonte: (REFFATTI, p.33, 2015).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo é classificado como pesquisa aplicada quanto a sua natureza, e o método a ser utilizado é o quantitativo e experimental. O estudo foi executado na Univinte Centro Tecnológico Eireli, junto a equipe FucapRoad, e contribuiu na fabricação da manga de eixo, peça que integra parte do sistema de suspensão de um veículo Baja SAE.

O procedimento metodológico adotado, consistiu na análise e replicação do processo de fundição realizado pela equipe FucapRoad na fabricação da manga de eixo. Dentre os critérios definidos encontra-se: definição dos parâmetros utilizados no processo de solubilização, escolha do modelo e dimensão do corpo de prova utilizado e a definição do planejamento experimental conforme figura 6.

Figura 6 - Fluxograma do planejamento experimental



Fonte: Do Autor.

Para determinar e realizar todas as etapas dos processos foi utilizado os seguintes itens abaixo relacionados:

- Computador ou notebook – utilizado para pesquisa, análise, cálculos e simulações;
- Softwares básicos diversos: como editores de textos, planilhas, imagens, etc;
- Software Autodesk Inventor – utilizado para simulação computacional;
- Lingote das ligas A206.0 e 356 para criação de corpos de provas;
- Forno tipo mufla – utilizado para derreter a liga de alumínio para criação corpos de provas, solubilização para o processo de tempera;
- Caixa e compostos para fundição em areia;
- Durômetro – para teste de dureza;
- Equipamento para ensaio de tração nos corpos de provas;

- Microscópio óptico – Análise metalográfica.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 SIMULAÇÃO

Na simulação computacional se utilizou o software Autodesk Inventor aplicando as forças e momentos encontrados segundo equações demonstradas no quadro 1.

Para o sistema de freio, o esforço foi determinado calculando o peso dinâmico no eixo dianteiro durante a frenagem. Utilizou-se a equação de peso dinâmico, considerando o diâmetro do disco de freio com 190 mm.

No suporte do sistema de direção, considerou-se o diâmetro do volante de direção (210 mm) e o esforço realizado pelo piloto. A força foi determinada calculando o momento exercido na direção conforme a equação do momento no sistema de direção e equação da força aplicada no suporte da direção, ilustrada no Quadro 1.

Conforme dados do drop-test utilizou-se a força de 763,92 N para o ensaio no suporte da suspensão. Na seção de resultados é apresentado os valores obtidos com maior expressividade e a simulação de máximo stress.

4.2 CORPO DE PROVA

Após aquisição dos lingotes referente às ligas A206.0 e 356, realizou-se o corte de cada tipo de material. Os mesmos foram acomodados em cadinhos individualizados, sendo levados para o forno mufla, com temperatura de 850°C, pelo período de 45 minutos para o derretimento do composto. E posteriormente foram vazados em um molde para formação de barras retangulares.

As barras retangulares foram usinadas para proporcionar seis corpos de prova de seção retangular

reduzido, conforme norma NBR-7549, sendo três corpos para cada tipo de liga (ABNT, 2001).

4.3 TRATAMENTO TÉRMICO

As amostras de ambas as ligas de alumínio foram submetidas a tratamento térmico T4, que consistiu em um aquecimento das amostras para processo de solubilização, sendo a utilizada temperatura de 530°C e um tempo de exposição de quatro horas para a liga A206.0 e de 540°C pelo período de quatro horas e trinta minutos para liga A356.

Na sequência realizou-se o resfriamento em água a temperatura ambiente. Em ambas o processo de envelhecimento foi natural.

4.4 ENSAIO DE DUREZA

Os corpos de prova foram denominados de amostra 1, 2 e 3 para ambas as ligas, sendo submetidas a teste de dureza em durômetro de impacto digital Wolteste modelo 2007.

Foram realizadas quatro medições em cada amostra, exceto nas duas primeiras amostras ensaiadas que receberam seis medições, nestas descartou-se o maior e menor valor encontrado para manter a padronização de quatro medições.

O ensaio foi realizado antes e após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento T4. A figura 7 indica a execução do ensaio de dureza na amostra 1 da liga A356 após o processo de tratamento térmico.

Figura 7 - Ensaio de dureza amostra 1, liga A356



Fonte: Do Autor.

Para realização do ensaio foi utilizada ponta esférica de carboneto de tungstênio de 3mm de diâmetro e energia de impacto igual a 11, conforme dados técnicos do dispositivo para o gradiente de dureza das ligas analisadas.

4.5 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração foram realizados utilizando máquina de tração universal (MTU) fabricada na Faculdade Capivari. A MTU utiliza célula de carga da marca Omega®, modelo LCCA-5K, sendo a carga máxima de 5000 Lbf ou 2297,96 Kgf.

Já no sistema de fixação foram utilizadas garras do tipo pega chapa representada na figura 8.

O gráfico tensão–deformação gerado pela MTU leva em consideração o deslocamento do suporte de ancoragem da garra de fixação para estimativa do deslocamento. Normalmente a deformação é obtida através do uso de extensômetro.

Figura 8 - Fixação da amostra durante o ensaio de tração



Fonte: Do Autor.

4.6 ANÁLISE METALGRÁFICA

Foram efetuadas análises metalográficas na seção lateral dos corpos de prova antes e após o tratamento térmico. As amostras foram preparadas realizando-se lixamentos consecutivos com material abrasivo de grana 320, 600, 800, 1200 e 2000, e polidas com óxido de cromo. O ataque químico para expor a estrutura foi preparado com solução de 2% de hidróxido de sódio NaOH.

As imagens micrográficas foram obtidas com a utilização de microscópio ótico da marca Laborama, modelo MTM-17T ligado a um computador.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No quadro 1 os valores das variáveis foram estimadas e obtidas com base no projeto do veículo baja SAE da equipe FucapRoad. Para o sistema de freio utilizando a força de 1537,35 N e um momento de 292,09 Nm. A tensão máxima

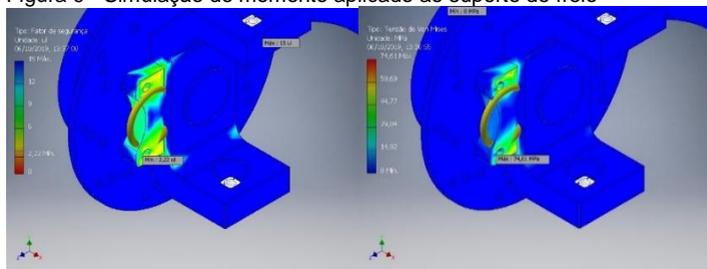
atingida com base nestes esforços foi de 74,61 MPa admitindo um fator de segurança de 2,22, conforme ilustração na Figura 9.

Quadro 1 - Equações proposta por Gillespie (1992) utilizadas para modelagem computacional.

Equações	Descrição das Variáveis
<p>Peso dinâmico durante frenagem</p> $Wf = W \left(\frac{c}{L} - \frac{ax}{g} + \frac{h}{L} \right)$ $Wf = 2256,3N \left(\frac{0,405m}{1,45m} - \frac{-11,28m/s^2}{9,81m/s^2} + \frac{0,507m}{1,45m} \right)$ $Wf = 1537,35 N$	<p>Wf = Peso dinâmico no eixo dianteiro na frenagem [N]; W = Peso do veículo [N]; c = Distância do centro de gravidade ao eixo traseiro [m]; L = Distância entre eixos [m]; ax = Desaceleração do veículo [m/s²] (58 km/h => 0 km/h, t = 5,5s, em 11,5m); g = Aceleração da gravidade [m/s²]; h = Altura do centro de gravidade [m].</p>
<p>Força transversal da roda.</p> $Fp = Wf * \mu$ $Fp = 1537,35N * 0,03$ $Fp = 461,20 N$	<p>Fp = Força transversal da roda [N]; μ = Coeficiente de atrito estático [adimensional].</p>
<p>Momento aplicado no eixo</p> $MFp = Fp * Rp$ $MFp = 461,20N * 0,3124m$ $MFp = 144,07 N.m$	<p>MFp = Momento aplicado no eixo [N.m]; Rp = Raio do pneu [m].</p>
<p>Momento no sistema de direção.</p> $M = F * d$ $M = 34,32N * 0,210$ $M = 7,207 N.m$	<p>M = Momento do sistema de direção [Nm]; F = Força exercida pelo piloto (estimada) [N]; d = Diâmetro do volante [m].</p>
<p>Força aplicada no suporte da direção</p> $F = \frac{M}{Rp_i}$ $F = \frac{7,207N.m}{0,0335m}$ $F = 215,13 N$	<p>F = Força exercida na Barra de direção; M = Momento no sistema de direção; Rp_i = Raio do pinhão.</p>

Fonte: GILLESPIE, 1992.

Figura 9 - Simulação de momento aplicado ao suporte de freio

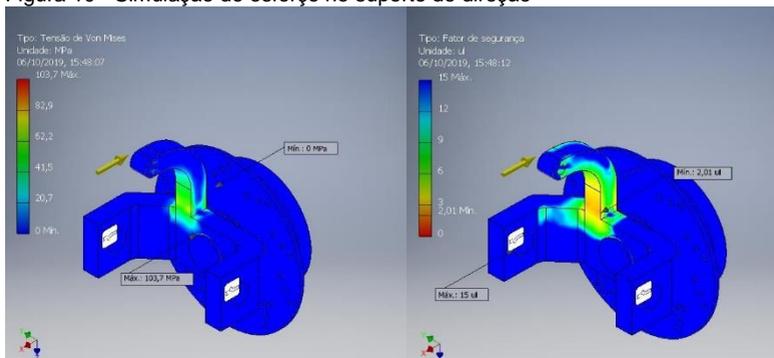


Fonte: Do Autor.

Em uma situação de máximo stress representado na Figura 10, a tensão de Von Mises encontrada no sistema foi de 103,7 MPa. Nesta condição foi admitido um fator de segurança

superior a 2 e o sistema suporta um esforço de até 1300 N com um deslocamento máximo de 0,123 mm.

Figura 10 - Simulação de esforço no suporte de direção



Fonte: Do Autor.

Conforme dados do drop-test foi utilizada a força de 763,92 N para o ensaio no suporte da suspensão. O fator de segurança encontrado foi de 5,39 e a tensão de Von Mises máxima obtida foi de 38,38 MPa.

5.2 ENSAIO DE DUREZA

A tabela 6 contempla os quatro valores de dureza Brinell encontrados em cada amostra, bem como a média e desvio padrão do ensaio de dureza sem o processo de endurecimento T4.

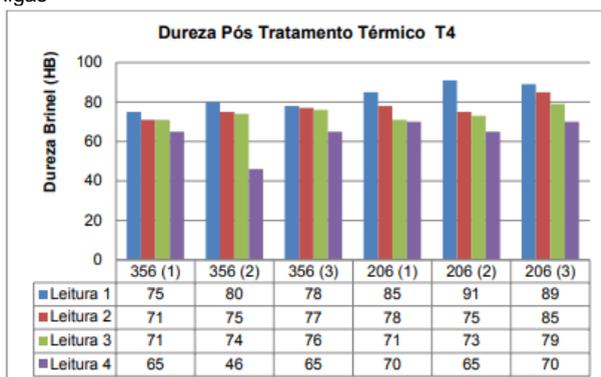
Anteriormente ao processo de tratamento térmico T4, a liga A356 apresentava uma maior dureza entre as duas ligas. Conforme o gráfico 1, após a realização do processo T4, a liga 17 A206.0 atingiu um maior ganho de dureza em relação a liga 356, tornando a liga Al-Cu 7,9% mais sólida que a liga Al-Si. O gráfico 2 apresenta a comparação das leituras de dureza média nas amostras antes e pós tratamento térmico.

Tabela 6 - Ensaio dureza nas amostras sem tratamento térmico T4

Amostra	Dureza sem Tratamento T4 (Brinel HB)				Média	Desvio padrão
356 Amostra 1	51	49	53	53	51,5	1,7
356 Amostra 2	55	60	59	48	55,5	4,7
356 Amostra 3	53	49	49	54	51,2	2,3
A206.0 Amostra 1	37	45	41	46	42,2	3,7
A206.0 Amostra 2	46	43	39	39	41,7	2,9
A206.0 Amostra 3	36	40	48	34	39,5	5,7

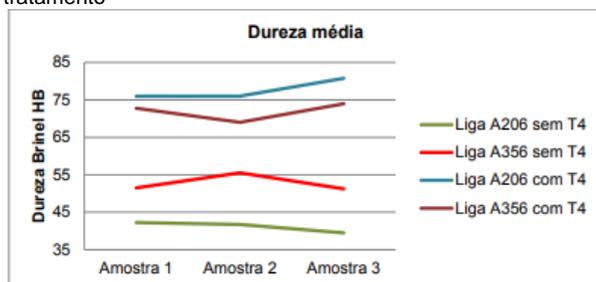
Fonte: Do Autor.

Gráfico 1 - Valores de dureza pós-tratamento T4 em todas as amostras de ambas as ligas



Fonte: Do Autor.

Gráfico 2 - Comparação das durezas média das ligas A206.0 e A356 sem e pós-tratamento



Fonte: Do Autor.

5.3 ANÁLISE METALGRÁFICA

A figura 11a mostra a micrografia da liga A206.0 com uma pequena quantidade de titânio e ferro, apresentando alto nível de impureza e estrutura dendrítica de grãos na liga não modificada. Após o tratamento térmico se observa o aumento de precipitados conforme figura 11b.

Figura 11 - Micrografia da liga A206.0. (A) Microestruturas interdendríticas mostrando AlFeCu, (B) dendritas fase α de AlCu em solução sólida na matriz de alumínio. (C) Precipitação por decomposição de AlCuMg



Fonte: Do Autor.

A micrografia em uma amostra não modificada por processo de tratamento térmico da liga A365 representada na figura 12a, mostra cristais eutéticos de silício com morfologia acicular e inclusões de defeitos.

Na liga Al-Si, após o tratamento térmico com solubilização e envelhecimento natural se observa na micrografia representada na figura 12b a formação de eutéticos interdendríticos e precipitados FeSiAl em diferentes proporções estequiométricas (C,D).

Figura 12 - Micrografia de amostra liga A356 sem processo de tratamento térmico, (A) fase β – partícula eutética de silício, (B) porosidade

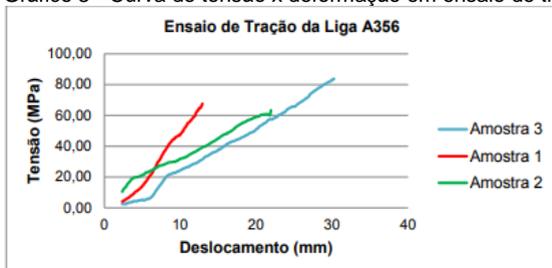


Fonte: Do Autor.

5.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

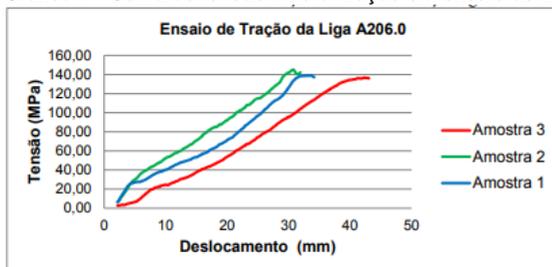
Os ensaios de tração representados no gráfico 3 apresentam as tensões obtidas na liga Al-Si. A liga A356 atingiu uma resistência de 88,87 MPa para a terceira amostra, a amostra 1 atingiu 67,6 MPa e 63,3 MPa para amostra 2. Já a liga 206.0 apresentou uma resistência bem superior quando comparada a liga Al-Si. A liga Al-Cu alcançou tensões de 144,8 MPa, 139,7 MPa e 137,3 MPa respectivamente para as amostra 2, 1 e 3 conforme gráfico 4.

Gráfico 3 - Curva de tensão x deformação em ensaio de tração liga A356



Fonte: Do Autor.

Gráfico 4 - Curva de tensão x deformação em ensaio de tração liga A206.0



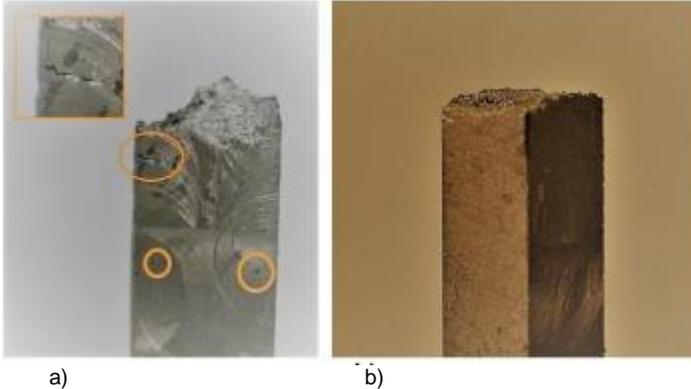
Fonte: Do Autor.

5.5 FRATURA

Na análise visual de ambas as ligas submetidas a ensaio de tração observa-se fratura frágil em todas as amostras. Não houve estrição na região do rompimento, e o

módulo de elasticidade não pôde ser calculado devido o deslocamento sofrer influência da acomodação mecânica entre o material ensaiado e a garra de fixação. Na liga A356 representada na Figura 13a o rompimento ocorreu a 45° , com o aparecimento de propagação de trincas e porosidades. Já para a liga A206.0, figura 13b o fraturamento típico ocorreu em 90° .

Figura 13: Fratura típica das ligas após ensaio de tração. a) liga A356 com propagação de trincas no detalhe. b) liga A206.0 ocorrência de fratura a 90°



Fonte: Do Autor.

6 CONCLUSÃO

Após execução de todos os testes e análises deste trabalho, conclui-se um ganho significativo de resistência mecânica em ambas as ligas de alumínio, no entanto alguns procedimentos experimentais podem levar a resultados mais satisfatórios. Entres os procedimentos pode se citar um melhor controle no processo de fundição, como: controle de temperatura do fundido, degaseficação e o pré-aquecimento do molde. A ausência destes processos elevou o nível de fragilização das ligas. Alguns pontos chamam atenção e merecem destaques:

- Ambas as ligas apresentaram ganho de resistência mecânica, com maior eficácia para liga A206.0,

apresentando dureza média 7,9% superior a liga A356;

- Dureza satisfatória para ambas as ligas, porém a ductilidade ficou abaixo do esperado;
- Formação irregular dos grãos na fase de solidificação, índice de porosidade elevado na liga A356;
- A liga A206.0 é recomendada para fabricação da manga de eixo, pois a resistência mínima apresentada no ensaio de tração (137,3 MPa) é superior em 32,40% a tensão máxima simulada (103,7 MPa), e ocorreram baixos níveis de defeitos. Como sugestão de melhorias futuras, aconselha-se:
 - Que a barra de direção tenha resistência inferior ao esforço máximo simulado de 1300 N, esta condição garante a proteção do suporte da direção da manga de eixo. Esta é a região de maior fragilidade obtida na simulação computacional e se aplicou o máximo esforço suportado sem que apresente falha no componente;
 - Controle e melhoria no processo de fundição, garantindo uma evolução dos resultados obtidos;
 - Redimensionamento do suporte da suspensão para fixação das balanças, que apresentou superdimensionamento com fator de segurança de 5,59;
 - Execução de envelhecimento artificial, a fim de acelerar o processo de precipitação

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 7549 Alumínio e suas ligas: ensaio de tração dos produtos dúcteis e fundidos.** Rio de Janeiro, 2001.

ALAM, T.; ANSARI, A. H. Review on aluminium and its alloys for automotive applications. **International Journal of Advanced Technology In Engineering and Science**, n 5, p 278-294, 2017.

AKASHI, A. **As vantagens da suspensão em alumínio**. Aluauto – ABAL (2013). Disponível em Aluauto: <http://aluauto.com.br/as-vantagens-da-suspensao-em-aluminio/>. Acesso em: 11jun. 2019.

ASKELAND, Donald R; PHULÉ P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

BEER, Ferdinand P.; JOHNSTON, E. Russell Jr.; DEWOLF, John T.; MAZUREK, David. F. **Mecânica dos materiais**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2015.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: Mc-Grae Hill, v. 2, 1986.

FASOYINU, Y.; WEISS D.; e SHAH J. New possibilities for high strength aluminum. **Modern Casting**, p 31-33, setembro de 2014.

FILLETI, A. **As novas Aplicações para o alumínio na indústria automotiva**. (2010). ABAL. 72 slides, Acesso em 7 de junho de 2016, disponível em: <http://www.damec.ct.utfpr.edu.br/automotiva/downloadsAutomot/b8AFilletiAluminio.pdf>. Acesso em 11jun. 2019.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. Pittsburgh: SAE – Society of Automotive Engineers, 1992.

JAZAR R. N. **Vehicle dynamics: theory and application**. New York LLC, 2008.

KAUFMAN, G. J.; ROOY, E. L. **Aluminum alloy castings: properties, processes and applications**. Estados Unidos: ASM international, 2004.

MAJOR, J.; HARTLIEB, M. Advances in aluminum foundry alloys for permanente and semi-permanent mold casting. **International Journal of Metalcasting**, v. 3, p. 43-53, jul. 2009.

Offroad Illini. **Site equipe Baja SAE da Universidade de Illinois em Urbana-Champagn**. Disponível em: <https://offroadillini.mechse.illinois.edu>. Acesso em: 02 nov. 2019.

REFFATTI, F. **Determinação das forças atuantes na suspensão dianteira de um veículo Baja SAE**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Horizontina, 2015.

REIMPELL, J.; STOLL, H.; BETZLER, J. W. **The automotive chassis: engineering principles**. 2. ed. Pittsburgh: SAE – Society of Automotive Engineers, 2002.

SMITH, W. F.; HASHEMI J. **Fundamentos de engenharia e ciências dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre, AMGH, 2012.

USP. **Processos de fundição**. Disponível em Universidade de São Paulo: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/354491/mod_folder/content/0/Fundição.pdf. Acesso em: 13 de jun. 2019.

ELETROFORMAÇÃO DE PEÇAS EM COBRE E NÍQUEL A PARTIR DE PEÇAS IMPRESSAS EM 3D

Rodolfo Lucas Bortoluzi¹
Fabício de Aguiar Joaquim²
Derek Manoel Luup Carvalho³

Resumo: Neste estudo foi proposto um novo método de fabricação de peças metálicas com o auxílio de impressão 3D por tecnologia de deposição de filamento de polianilina para preparação dos madris que servem de molde para as peças eletroformadas. Foram estudadas as condições de eletroformação e ficou demonstrada a viabilidade da técnica proposta, que apesar de viável pode ainda ser muito melhorada através de maiores estudos nas condições físico químicas de eletroformação.

Palavras-chave: Eletroformação. Fabricação avançada. Peças de precisão. Impressão 3D.

1 INTRODUÇÃO

Os desenvolvimentos tecnológicos das últimas quatro décadas transformaram o mundo em termos de produtividade, acesso à informação, qualidade de vida e gestão. Nas indústrias, tecnologias disruptivas permitiram a redução de custos trabalhistas, a automação de linhas produtivas e a substituição ferramentas manuais por novos equipamentos de controle numérico computadorizado (CNC).

Em paralelo, e aproveitando estes avanços tecnológicos, revolucionários processos de produção foram criados. Um dos quais, a tecnologia de impressão 3D (ou manufatura aditiva), desenvolvida tirando proveito do maior poder de processamento de dados e da tecnologia CNC já

¹ E-mail: qmclouca@gmail.com.

² E-mail: prof.eng.fabriciojoaquim@gmail.com.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

generalizada.

Atualmente, é possível produzir artigos de plástico por manufatura aditiva a partir de modelos digitais em 3D. No entanto, para a impressão em 3D de peças de metal, há uma falta de tecnologias que permitam o uso por pequenos usuários, ou mesmo pelo consumidor final. Os processos disponíveis são ineficientes devido ao custo das matérias primas, alto consumo de energia e necessidade de pósprocessamento, como a utilização de fornos de alta temperatura para a sinterização de pós metálicos.

Ao contrário de fabricação convencional, na manufatura aditiva, não há substancial geração de resíduos por processos de pós-conformação, como corte, usinagem e polimento. Permitindo uma economia de material e de trabalho vantajosa, bem como a redução de custos ambientais. Em relação à impressão 3D de metais, as tecnologias de fusão por feixe de elétrons e sinterização a laser são usadas com relativo sucesso, mantendo a desvantagem de exigir têmpera pósconformação e sinterização. Além disso, o processamento de matérias-primas, normalmente pós-metálicos com tamanho de grão muito fino, geralmente abaixo de 400 mesh, requer processos com altos custos energéticos, fazendo com que a manufatura aditiva metálica continue uma rota tecnológica de fabricação inviável em comparação com tecnologias tradicionais a como moldagem por areia verde, limitando o seu âmbito a prototipagem rápida. Além disso, a produção de pósmetálicos demanda a existência prévia do metal em forma de ligas, tais como, por exemplo, aço. Isso necessita de uma continuidade na cadeia produtiva de metais, já estabelecida, sendo necessária uma fase de transformação dos minérios na forma de óxidos metálicos que é fundamentalmente baseada na redução com carvão mineral ou vegetal (Siderúrgicas). Por outro lado, a impressão metálica 3D requer apenas sais dos metais, essa etapa produtiva pode ser feitas diretamente dos minérios ROM (run of mine), diminuindo drasticamente o número de etapas da cadeia industrial e logística necessários para a indústria metalúrgica.

Alguns metais com reatividade alta são ainda mais

difíceis de processar pelos sistemas atuais de manufatura aditiva metálica como os já citados métodos de fusão por feixe de elétrons e sinterização a laser. O alumínio se destaca entre estes metais já que a produção de peças de alumínio é tecnologicamente crítica para muitas indústrias importantes, como a aeronáutica, automobilística e eletrônica. Casos de sucesso na obtenção de filmes de alumínio com o uso de líquidos iônicos profundamente eutéticos (deep eutectic solvent), abriram a possibilidade de produzir filmes com espessura e adesão adequada pelo uso de eletrodeposição de alumínio 3 utilizando um líquido iônico relativamente barato e com baixa toxicidade: cloreto de colina. (Berman B. 2012).

Com as crescentes exigências ambientais, econômicas e sociais, o uso de métodos eficientes de produção que eliminem etapas de alto consumo energético e ambiental, não apenas no final da cadeia de produção, mas em todo o seu ciclo de produção, é de grande interesse público.

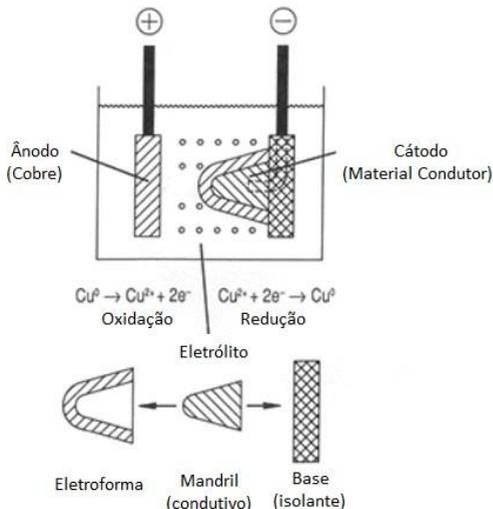
Neste contexto, as técnicas de eletrodeposição metálica podem contribuir com a manufatura aditiva, permitindo a produção de depósitos metálicos muito compactos com elevada precisão no posicionamento do metal depositado, sendo necessário para isso, apenas o controle do fluxo de eletrodeposição através da corrente e potencial de eletrodeposição. Uma grande quantidade de técnicas de eletrodeposição pode ser facilmente adaptada a impressão 3D eletroquímica, sendo necessário ajustar caso a caso os parâmetros que influenciam na velocidade de eletrodeposição como por exemplo, os fenômenos de transporte de difusão e convecção, a corrente limite impressa no circuito e o potencial eletroquímico aplicado.

Quanto a parte de computação gráfica necessária ao método, modelos são facilmente preparados com a utilização de softwares adequados para desenho assistido por computador (CAD). A maioria destes softwares como os distribuídos pela Autodesk (AutoCad) e até os softwares livres de modelagem 3D distribuídos por empresas como a Trimble (SketchUp) já incluem o suporte para geração de arquivos no formato de estereolitografia (.STL) criado pela 3D Systems

como parte do software AutoCad original. Os arquivos .STL gerados desta maneira descrevem apenas a superfície geométrica de um objeto tridimensional sem incluir nenhuma informação de cor, textura ou outros atributos dos modelos tridimensionais.

Agora que já sabemos como criar facilmente moldes complexos (madrís) para a fabricação, devemos nos concentrar em como utilizar esses madris para a eletroformação, devemos então revisar a técnica. A eletroformação é uma técnica única de manufatura que em essência, se mostra bastante simples. Apesar de sua simplicidade, a eletroformação é uma ferramenta poderosa e versátil que pode ser utilizada em situações onde outros métodos de manufatura são problemáticos, ineficientes, muito caros ou até impossíveis de utilizar. Foi inventada em 1837 por Jacobi B. S. na Rússia, naquela época um dos países mais desenvolvidos na área 4 de química (Kudryavtsev, V.N., 1994). A figura 1, abaixo mostra de forma simplificada o processo de eletroformação.

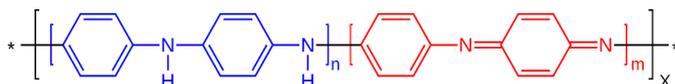
Figura 1 - Processo simplificado de eletroformação (Sole, M.J. , 1994).



Fonte: Traduzido pelo acadêmico.

Daí se assume a necessidade da adoção de um mandril condutor para permitir a eletroformação. A produção de madris (modelos tridimensionais para a eletrodeposição controlada de metais), pode ser feita através da impressão peças em 3D por tecnologia FDM (Filament Deposition Method) e uso de polímeros eletrocondutivos como a polianilina. A polianilina (PANI) possui a cadeia carbônica mostrada na figura 2. A PANI é um polímero condutor da família dos polímeros flexíveis, possui alta condutividade elétrica. Entre a família de polímeros condutores, polianilina é único devido à sua facilidade de síntese, a estabilidade ambiental, e doping simples / dedoping química. (Wikipedia, acesso 01/12/2019 12:24).

Figura 2 - Estrutura carbônica da polianilina.



Fonte: Wikipedia, acesso 01 dez. 2019.

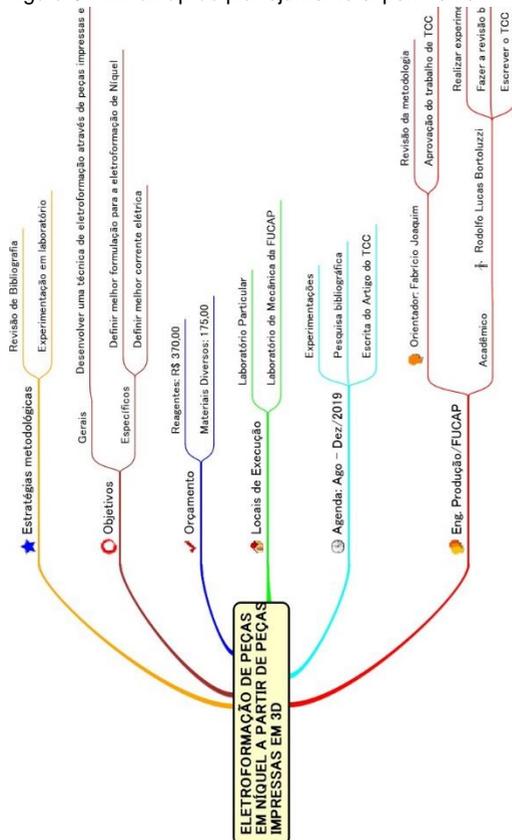
A união das técnicas de impressão 3D, de conhecimentos sobre a química de polímeros avançados (eletrocondutores) como a polianilina, da técnica de eletroformação, permitiu ao autor propor uma nova técnica de manufatura, que é o foco do trabalho em tela.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo é classificado como pesquisa aplicada quanto a sua natureza, e o método a ser utilizado é o quantitativo e experimental. O estudo foi executado no laboratório particular do acadêmico, e faz parte de um conjunto de estudos mais complexos sobre métodos de fabricação avançados para a nova indústria 4.0, irá contribuir significativamente para o entendimento do acadêmico sobre a melhor forma de produzir peças metálicas com alta precisão dimensional.

O procedimento metodológico adotado, consistiu na análise, replicação e definição das melhores condições de fabricação de peças de cobre e níquel eletroformadas a partir de modelos pré-fabricados em impressoras 3D. Os critérios de fabricação estudados foram a definição dos parâmetros utilizados no processo de eletroformação como a solução eletroquímica necessária, correntes eletroquímicas necessárias e produção de pequenas amostras para verificação da qualidade dimensional. A figura 3 abaixo mostra o mapa metal (MindMap) do trabalho realizado.

Figura 3 - MindMap do planejamento experimental.



Fonte: Do Autor.

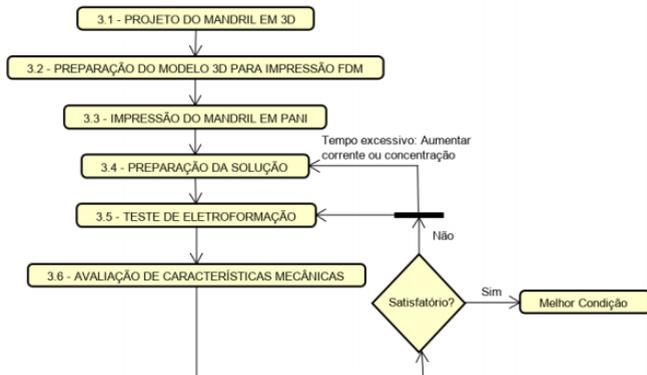
Para determinar e realizar todas as etapas propostas no MindMap da figura 3 utilizado os seguintes itens abaixo relacionados:

- Notebook Lenovo modelo 300 – utilizado para pesquisa, análise, cálculos e simulações;
- Softwares básicos diversos: como editores de textos, planilhas, imagens, etc;
- Software Autodesk AutoCad Student Version 2019 – utilizado para o desenho 3D do modelo de mandril;
- Software open source PronterFace – Utilizado como fatiador do arquivo estereolitográfico criado no Autodesk AutoCad Student Version 2019.
- Produtos químicos: Sulfamato de níquel ($\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2$), cloreto de níquel ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), ácido bórico (H_3BO_3), água destilada (H_2O), Sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Ácido Sulfúrico (H_2SO_4); 7
- Tanque de polipropileno, pedaços de fios de cobre, pinças jacaré, fonte chaveada de 0-32 V/0-5 A, termômetro;
- Durômetro – para teste de dureza;

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental deste trabalho segue o fluxograma apresentado na figura 4. O fluxo de trabalho experimental foi definido com base na técnica de desenvolvimento em cascata semi incremental, devido ao baixo orçamento e disponibilidade de tempo não houve exaustão das possibilidades de melhoria, cabendo a este trabalho a demonstração da viabilidade da técnica.

Figura 4 - Fluxograma da metodologia experimental utilizada para a execução do estudo



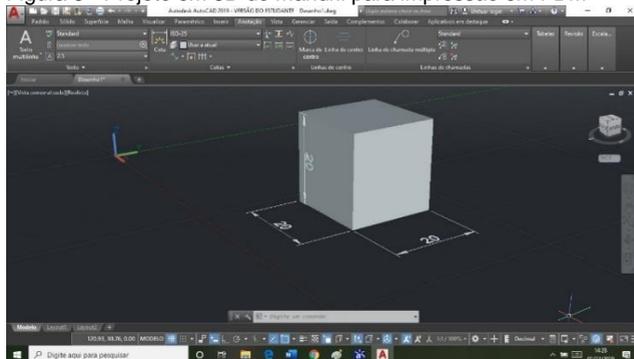
Fonte: Do Autor.

Serão apresentados nas próximas páginas os procedimentos seguidos para cada uma das etapas listadas na figura 4.

3.1 PROJETO DO MANDRIL EM 3D

O mandril foi desenhado na forma de um cubo em 3D com 8,00 cm³ (2,00 cm X 2,00 cm X 2,00 cm). Foi realizado no software Autodesk AutoCad Student Version 2019, precisão dimensional centesimal. A figura 5, mostra o projeto do mandril.

Figura 5 - Projeto em 3D do mandril para impressão em FDM



Fonte: Do Autor.

3.2 PREPARAÇÃO DO MODELO EM 3D PARA IMPRESSÃO FDM

O mandril projetado foi então transformado em estereolitografia pelo próprio Autodesk AutoCad Student Version 2019, através do comando ENVIAR PARA SERVIÇO DE IMPRESSÃO 3D. A figura 6 mostra a tela do programa.

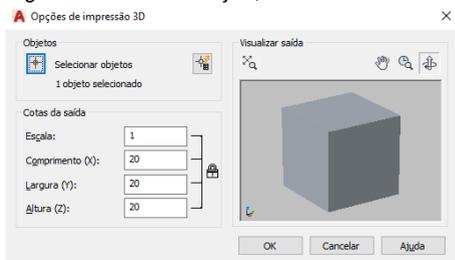
Figura 6 - Comando que permite a criação de arquivos STL a partir de modelos 3D no AutoCad



Fonte: Do Autor.

A figura 7 mostra as opções de redimensionamento dos modelos em 3D fornecidas pelo software, além da visualização da estereolitografia criada.

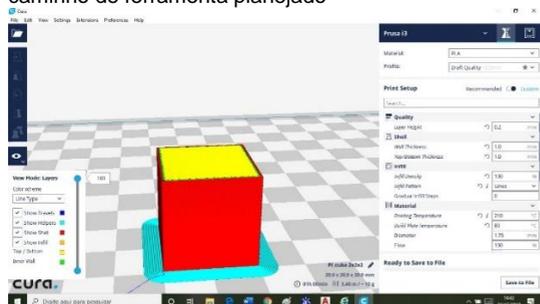
Figura 7 - Tela de seleção, redimensionamento e visualização do STL criado



Fonte: Do Autor.

A partir do arquivo STL criado foi criado o caminho da ferramenta de impressão 3D com auxílio do software Cura 2.6.2. A tela do programa com o projeto aberto e pronto para fatiamento é apresentada na figura 8.

Figura 8 - Tela do software Cura 2.6.2 com o fatiamento do projeto do mandril e o caminho de ferramenta planejado



Fonte: Do Autor.

As configurações de impressão são mostradas na tela do software Cura 2.6.2 mostrada na figura 9. O software produz um caminho CNC da ferramenta de impressão no formato .GCODE. Códigos G e M podem ser utilizados para modificar o arquivo assim criado de modo a melhorar as características de impressão e portanto permitir uma melhoria contínua dos resultados de impressão.

Figura 9 - Configurações de fatiamento e impressão do mandril por FDM, a tela de configurações de perfil de impressão do programa Cura 2.6.2 é apresentada

Setting	Profile	Current	Unit
Quality			
Layer Height	0.2	0.2	mm
Shell			
Wall Thickness		1.0	mm
Top/Bottom Thickness		1.0	mm
Infill			
Infill Density		100	%
Infill Pattern		lines	
Material			
Printing Temperature		210	°C
Build Plate Temperature		80	°C
Enable Retraction		False	
Speed			
Print Speed		50	mm/s
Travel Speed		80	mm/s
Cooling			
Enable Print Cooling		False	
Build Plate Adhesion			
Brim Width		4	mm

Fonte: Do Autor.

3.3 IMPRESSÃO DO MANDRIL EM PANI

Foi utilizada uma impressora 3D FDM para imprimir o mandril criado em GCODE. A figura 9 mostra a foto da impressora utilizada. O filamento de PANI foi adquirido da empresa Filament2print.

Figura 9: Impressora 3D utilizada no trabalho.



Fonte: Do Autor.

3.4 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO

As soluções de eletroformação para níquel e cobre foram preparadas através da diluição dos produtos químicos em água destilada conforme os dados da tabela 1.

Tabela 1: Soluções de eletroformação

Eletrólito de Sulfamato de Níquel	Propriedades
Sulfamato de Níquel	250-450 g/L
Cloreto de Níquel	0-30 g/L
Ácido Bórico	30-45 g/L
Eletrólito de Cobre Ácido	Propriedades
Sulfato de Cobre Pentahidratado	200-250 g/L
Ácido Sulfúrico	50-75 g/L
Cloretos	20-60 ppm

Fonte: Do Autor.

3.5 TESTE DE ELETROFORMAÇÃO

As condições de eletroformação foram mantidas dentro das faixas apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Condições de eletroformação testadas

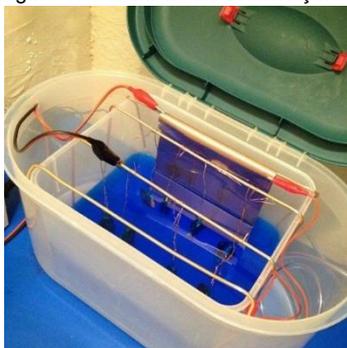
Condições	Unidades
Temperatura do banho	32-70°C
Ph	3,0 – 5,0
Agitação	Mecânica permanente 20 RPM
Densidade de Corrente no Cátodo	45 – 3450 A.m ⁻²

Do Autor.

3.6 TESTE DE ELETROFORMAÇÃO

Foi montada uma cuba de eletroformação com um tanque de polipropileno conforme mostra a figura 10, observe que existem dois recipientes, o externo serve como banho termostaticado para o controle da temperatura do banho.

Figura 10 - Cubo de eletroformação com solução de cobre ácido



Fonte: Do Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo os procedimentos escritos na figura 3, foi possível obter peças em cobre e níquel com a forma do mandril impresso em 3D, uma destas peças ainda 13 em processo de eletroformação foi retirada da cuba para melhor visualização e é apresentada na figura 11.

Figura 11 - Peça de cobre em processo de eletroformação sobre um mandril de PANI



Fonte: Do Autor.

Como demonstra a foto da figura 11, a técnica proposta se mostrou viável para eletroformação, tanto de peças em cobre como de peças em níquel. As propriedades mecânicas foram avaliadas e apresentadas na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das peças eletroformadas em cobre e níquel

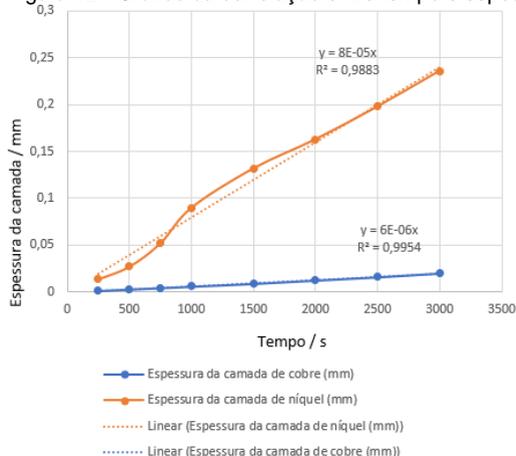
Propriedades	Peças de cobre	Peças de Níquel
Resistência a Tração	200 – 240 MPa	400 – 600 Mpa
Elongação	15 – 25 %	10 – 25 %
Dureza Vickers (100 g de carga)	41 - 72	170 - 230

Fonte: Do Autor.

Através da utilização de um micrômetro foi possível relacionar o tamanho das peças eletroformadas com o tempo

de eletroformação, a partir dos dados destas comparações o gráfico da figura 12 foi desenhado, e as equações de correlação foram traçadas permitindo de forma empírica determinar o tempo necessário para obter a espessura da camada desejada.

Figura 12 - Gráfico da correlação entre tempo e espessura da camada eletroformada



Fonte: Do Autor.

A partir dos dados do gráfico da figura 12 é possível verificar que é muito mais veloz a eletroformação de níquel, no entanto deve-se resaltar que as condições experimentais não foram exploradas até a exaustão, portanto são passíveis de melhorias. Como o propósito deste trabalho é propor uma nova técnica de fabricação e demonstrar sua viabilidade consideram-se suficientes os dados apresentados.

5 CONCLUSÃO

Após execução de todos os testes e análises deste trabalho, conclui-se que a técnica de eletroformação a partir de mandris impressos em PANI através de tecnologia FDM é viável, relativamente rápida, com excelentes propriedades de controle dimensional, bom acabamento superficial, propriedades mecânicas das peças dentro do normal para

peças eletroformadas e que existem uma margem 15 grande de possibilidades de aumento da velocidade de eletroformação através da otimização dos parâmetros experimentais dentro das faixas de parâmetros utilizadas nas tabelas 1 e 2. Alguns pontos chamam atenção e merecem destaques:

- Ambas as soluções de eletrólitos utilizadas se mostraram com bom desempenho para o processo;
- Dureza satisfatória para ambas as ligas, porém a ductilidade ficou abaixo do esperado;
- Formação irregular dos grãos na fase de solidificação, índice de porosidade elevado nas duas composições testadas; Como sugestão de melhorias futuras, aconselha-se:
- Otimizar os parâmetros físico químicos de eletroformação;
- Verificar a possibilidade de utilização de outros polímeros eletrocondutores;
- Testar geometrias mais complexas;
- Verificar qual a influência do “poder das pontas na espessura das camadas eletrodepositadas.

REFERÊNCIAS

BERMAN B. 3-D printing: the new industrial revolution. **Business Horizons**, 55, 155- 162, 2012;

KUDRYAVTSEV, V. N. **History of electroplating and electroforming in Russia**. 72. 11-14. 1994.

SOLE, M. J. JOM. 46: 29. 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03220715>). Acesso em 01 dez. 2019.

WIKIPEDIA. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Polianilina#/media/Ficheiro:Polyaniline_structure.svg. Acesso 01 dez. 2019.

DEFINIÇÃO DE UMA CURVA DE TEMPERATURA PARA TRATAMENTO TÉRMICO EM MATRIZ DE PARAFUSO FRANCÊS CONFORMADO A FRIO

Deyvid de Oliveira Borges¹

Mario Souza Pacheco Junior²

Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Derek Manoel Luup Carvalho⁴

Resumo: Para que os aços ferramentas atinjam durezas elevadas, os mesmos devem ser tratados termicamente. Existem diversas categorias de aços ferramentas, podendo ser para trabalho a quente, para corte ou conformação a frio, para moldes plásticos, etc. Entretanto, para cada peça das matrizes, é utilizado um material específico e para cada material é exigido um intervalo de dureza Rockwell C diferente. O maior obstáculo é determinar o processo correto de um tratamento térmico para cada peça, e isto não é tão simples, pois precisa considerar tempo de aquecimento, temperatura a ser elevada, tempo de manutenção, velocidade e tipo de fluido a ser utilizado no resfriamento da peça. Como determinar a curva de tratamento térmico “ideal” para cada peça? O trabalho terá como variação a curva de temperatura em um dos componentes de matriz para conformação da cabeça de parafuso francês M16. Onde serão feitos os testes de dureza e análise metalográfica nas amostras de aço SAE D2, a fim de entender melhor e comparar os resultados que poderão ser vistos as várias transformações das propriedades microestruturais do material devido às variações de temperatura selecionadas para cada pastilha. Construir curvas de temperatura de têmpera e revenimento para mostrar o comportamento de cada pastilha no decorrer do procedimento metodológico, com os dados retirados de

¹ E-mail: deyvidborgesn@gmail.com.

² E-mail: mariopachecojr866@gmail.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br1.

⁴ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

durezas e temperaturas serão aplicadas na correlação entre essas grandezas para assim obtermos uma equação empírica que descreva essa curva, gerando um método para descobrir a temperatura que se deve utilizar para têmpera no material através da dureza que se deseja obter.

Palavras-chave: Conformação a frio. Tratamento térmico. SAE D2. Dureza.

1 INTRODUÇÃO

Na indústria metal-mecânica, há inúmeros processos de fabricação tais como processos de usinagem, estampagem, solda, caldeiraria, dentre outros. Para determinar qual processo utilizar, deve-se considerar diversos fatores, entre eles: geometria da peça, material a ser confeccionado o produto final, aplicação do mesmo, custo-benefício, entre outros. Após a análise de todos os fatores que podem influenciar e/ou comprometer a finalidade, de tal peça a ser aplicada, então pode-se estabelecer o melhor processo, ou o mais viável para fabricação da peça em questão.

Na produção de parafuso francês para eletro-ferragens, os mesmos são conformados a frio, por processo de estampagem em prensas horizontais de dois ou mais estágios, específicas para estampagem de parafusos, pinos, pregos, etc. Existem parafusos de diversos tamanhos e para cada diâmetro de rosca e comprimento do parafuso, requer um conjunto de matrizes, sendo uma matriz em cada estágio, na qual cada matriz é formada por um conjunto de peças. Para cada componente das matrizes, é utilizado um material específico, de acordo com a função exercida e esforços a qual é submetido no processo. Todavia, todos os componentes são aços-ferramenta especiais.

Assim, optar por aços nobres na confecção das ferramentas, ainda não é o suficiente, pois os esforços ao qual serão submetidos, é extremamente alto. Necessita-se que os componentes sejam de elevadas durezas para resistirem ao desgaste mecânico por atrito, e ao mesmo tempo, resistentes aos impactos aos quais são sujeitos na conformação da cabeça

dos parafusos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As bibliografias revisadas neste artigo de conclusão de curso tem a intenção de descrever de maneira sucinta, os conceitos básicos sobre conformação a frio, tratamentos térmicos necessários do aço ferramenta SAE D2 que é utilizado na pastilha da matriz para estampagem de parafuso, bem como o ensaio de dureza Rockwell C e análise metalográfica feita na pastilha após o tratamento térmico.

2.1 CONFORMAÇÃO A FRIO

Os processos de conformação a frio são usados quando se quer obter uma deformação plástica do material, alterando sua geometria física para se chegar ao formato desejado. Essa deformação ocorre devido a esforços que os aços ferramentas exercem sobre a peça a ser conformada, existem diversos fatores que influenciam na característica de uma conformação, como por exemplo, a composição química e a estrutura metalúrgica (tamanho, forma, natureza e distribuição de fases presentes) dos materiais utilizados. (SANTOS, 2006).

Segundo Santos (2006), o processo de conformação a frio para fabricação de parafuso é constituído pelas seguintes etapas basicamente:

- Corte por cisalhamento;
- Posicionamento do material de uma ferramenta para outra (conjunto de matrizes);
- Conformação a frio da cabeça do parafuso francês;
- Laminação para confecção da rosca;

Deve-se levar em consideração alguns aspectos importantes para escolha do aço ferramenta a ser utilizado para a fabricação, como:

- Resistência ao desgaste;
- Tenacidade;

- Tensões e esforços no processo de conformação;
- Total de peças a produzir;
- Custo;
- Tratamento térmico;
- Acabamento superficial.

Para um fabricante de parafuso o que mais influencia na escolha de materiais para ferramentas de conformação mecânica é o fator do custo do material, visto que quanto maior a necessidade de um metal duro e elevada resistência, maior será o custo do mesmo. O aço SAE D2 é um dos tipos de aços mais frequentemente utilizados para conformação a frio, depois de ser temperado e revenido chegando a uma dureza entre 56 e 61 HRC, tem uma capacidade maior de temperabilidade e uma boa resistência ao desgaste comparado a outros materiais utilizados também para procedimentos semelhantes. (SANTOS, 2006).

O metal duro assume como principais características elevada rigidez, resistência à compressão e ao desgaste, porém possui baixa tenacidade, baixa resistência à tração e à fadiga e seus custos elevados. Desta forma o metal duro é indicado para grandes produções de peças, altas quantidades diárias com tolerâncias dimensionais precisas em equipamentos que possam evitar a falha das matrizes por tração ou fadiga.

A dureza é uma das propriedades do material que limita a ação do penetrador de medição sobre a superfície, também pode ser expressa pela força de penetração e a área de contato final, o que irá resultar em forças de pressão.

São conhecidos alguns tipos de dureza por penetração em função da geometria do penetrador e das condições de aplicação de força. As durezas brinell, vickers e rockwell destacam-se pela grande utilização no mundo todo. Estes métodos compreendem uma grande gama de tipos de penetradores, que variam em geometria (esféricos, piramidais e cônicos) e que podem ser de diferentes materiais (aço, metal duro e diamante). (DIETER, 1967; ISO 6506-1, 1999; ISO 6507-1, 1997 e ISO 6508-1, 1999).

O ensaio de dureza Rockwell é hoje o processo mais utilizado, devido a sua rapidez e facilidade de execução e visualização, além de não sofrer alterações devido a erros humanos, e pela facilidade em detectar pequenas diferenças de durezas em pequenos tamanhos de impressão.

Neste ensaio a carga é aplicada em etapas, ou seja, primeiro se aplica uma pré-carga, garantindo um contato firme entre o penetrador e o material a ser analisado e somente depois é feita a aplicação da carga do ensaio propriamente dito. O grau de dureza é apresentado num mostrador acoplado à máquina de ensaio, de acordo com a escala pré-determinada e adequada à faixa de dureza do material.

2.2 DESGASTE

O desgaste de uma ferramenta influencia diretamente na eficiência de uma produção de um determinado componente e também na sua qualidade final de acabamento, este é o ponto mais crítico, ou seja, o maior causador dos problemas que são comuns em indústrias metalúrgicas como mau acabamento dimensional, desalinhamento da produção e as paradas indesejadas para um mercado que busca cada vez mais velocidade na fabricação de seu produto pelo menor custo. (SANTOS, 2006).

Sendo um dos principais meios de desgaste para estas ferramentas é o atrito de superfícies de contato por escorregamento relativo entre matriz e o material do parafuso. Leonardo Da Vinci (1452 – 1519) deu grandes contribuições para estudos relacionados a fenômenos de atrito e desgaste. Da Vinci mediu forças de atrito em planos horizontais e inclinados. Ele mostrou que as forças de atrito eram dependentes da força normal ao deslizamento de corpos e independentes da área de contato aparente. Propôs uma distinção entre atrito de escorregamento e de rolamento, além de investigar a influência do lubrificante na redução do atrito.

2.3 AÇOS FERRAMENTA

Os aços utilizados na fabricação de ferramentas para conformação mecânica são denominados de aços ferramentas. Os mesmos evoluíram drasticamente desde a primeira revolução industrial (século XIX), onde eram apenas ligas de ferro e carbono, para atualmente existirem aços-liga de alta complexidade química.

Entre os elementos mais aplicados nas ligas dos aços ferramentas, pode-se citar o Tungstênio (W), Vanádio (V), Cromo (Cr), Molibdênio (Mb), Silício (Si), Manganês (Mn) e o Cobalto (Co), etc. Para especificar quais destes elementos serão adicionados ao ferro e carbono, tem-se que analisar as propriedades físicas e mecânicas desejados no aço, para a partir da necessidade de aplicação, determinar as ligas a serem utilizadas no aços ferramenta. Em geral, os esforços e as ações na qual a ferramenta será submetida em trabalho é que determinará as propriedades que o aço a ser utilizado necessita. É certo que com a quantidade de elementos de ligas existentes, pode-se variar muito a composição e propriedades físicas e mecânicas dos materiais, todavia as ligas foram classificadas de acordo com a aplicação comum a que são destinadas. Existem aços ferramentas para serviço a quente, para trabalho a frio, para corte, para resistência ao desgaste, para resistirem a impacto, etc. (MENDES, 2009).

Apesar de os aços ferramenta serem classificados (normatizados) de acordo com a aplicação, é comum na indústria fazerem testes com aços de outras “família” (classe de aplicação) para determinada atividade, afim de verificar qual tem melhor desempenho e melhor custo-benefício para determinada aplicação na empresa. O quadro 1 abaixo cita aços ferramentas de acordo com suas aplicações. (MENDES, 2009).

Quadro 1 - Estão classificados os aços ferramentas de acordo com a aplicação, segundo a norma AISI (American Iron and Steel Institute)

Utilização principal	Denominação	Ligas
Trabalho a frio	W	W1, W2, W5
	O	O1, O2, O6, O7
	A	A2, A4, A6, A7, A8, A9, A10, A11
	D	D2, D3,, D4, D6, D7
Resistente ao impacto	S	S1, S2, S4, S5, S6, S7
Trabalho a quente	H	H10-19 ao Cr
		H20-39 ao W
		H40-59 ao Mo
Aços rápidos	M	M1, M2, M3, M7, M10, M33, M42, M50 ao Mo
	T	T1, T4, T5, T6, T8, T15 ao W
Moldes	P	P6, P20, P21
Especiais	L	L2, L6

Fonte: American Iron and Steel Institute.

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

As propriedades mecânicas, bem como o desempenho em serviço de um metal e em especial das ligas de aço dependem da sua composição química, da sua estrutura cristalina e do histórico de processamento e dos tratamentos térmicos realizados. (SILVA, 2012).

Tratamento térmico é um processo que tem como seu maior objetivo transformar as propriedades mecânicas de um material, como a dureza, resistência mecânica, ductilidade, ou seja, consiste em uma operação que visa melhorar o desempenho de produtos sem alterar sua forma. O procedimento pode ser definido como uma operação ou um conjunto de operações que envolvem o aquecimento, permanência de temperatura e resfriamento de um material, esse processo altera a microestrutura do material, e por consequência muda as suas propriedades mecânicas de um modo desejável. (DIGGES, 1966).

Para compreender melhor, analisamos o seguinte, uma mola espiral de um veículo automotor. Ao ser comprimida, na passagem do veículo por uma lombada, a mola acumula

energia amortecendo o movimento da roda. Após a passagem pela lombada a mola se estende devolvendo a energia acumulada e fazendo a roda do veículo retornar à sua posição inicial. O tratamento térmico permite que a mola sofra deformação elástica sem perder sua forma e a geometria original. Para resistir a esses esforços é preciso que a mola tenha dureza elevada, elasticidade e resistência mecânica para não sofrer deformação plástica permanente. (DIGGES, 1966).

Normalmente, os aços ferramenta têm temperaturas de tratamento de têmpera prédefinidos pelo seu fabricante, e, salvo em casos excepcionais, não devem ser alterados, sob risco de mudanças drásticas nas propriedades alcançadas. Novas possibilidades devem sim ser estudadas, testadas e analisadas antes de tornarem-se usuais.

Em um processo de tratamento térmico, o componente a ser tratado poderá sofrer distorções dimensionais ou até mesmo levá-lo a fratura, tudo isso devido às altas tensões gerada pelo aquecimento, ou seja, pelo gradiente térmico elevado e pelas transformações metalúrgicas que ocorrem no material a ser temperado. Quando essas tensões excedem ao limite de escoamento do componente, logo o corpo será capaz de sofrer distorções dimensionais e, também no caso da tensão de ruptura do material, o mesmo o levará ao surgimento de trincas. (TOTTEN, HOWES, 1997).

2.4.1 Fatores que influenciam no tratamento térmico

De acordo com Chiaverini (1986), devido ao tratamento térmico ser um ciclo aquecimento e temperatura, vários fatores a serem considerados, sendo principalmente eles: aquecimento, tempo de permanência à temperatura, ambiente do aquecimento e resfriamento.

Sabendo que o principal objetivo do tratamento térmico é alteração das propriedades físicas e mecânicas do material, é necessário que o mesmo seja aquecido acima da temperatura de recristalização, ou temperatura crítica, como também é denominada. (CHIAVERINI, 1986).

O tempo em que o aço permanece em temperatura acima da “zona crítica” é extremamente importante, pois tem que ser suficiente para que toda a peça aqueça de maneira uniforme acima da temperatura de recristalização, todavia não pode exceder muito o tempo necessário, podendo causar o crescimento dos grãos, algo indesejado em peças temperadas por exemplo. (CHIAVERINI, 1986).

Uma atmosfera não preparada, pode até ser irrelevante no tratamento térmico em determinados materiais, mas para alguns aços liga, pode ser indesejada. A atmosfera comum, além de causar oxidação formando uma película na superfície da peça, pode causar “descarbonetação”, que é a formação de uma camada de menor dureza, também na superfície do aço. Para evitar alguma destas ocorrências, cria-se uma atmosfera protetora (CHIAVERINI, 1986). Nesse tratamento foi utilizado carvão vegetal moído.

No tratamento dos aços, a velocidade do resfriamento é um dos fatores de maior relevância, visto que pode alterar as propriedades físicas dos materiais. O principal determinante da velocidade de resfriamento é o meio pelo qual a peça é resfriada, podendo este causar elevadas tensões internas, quando o resfriamento ocorre de maneira abrupta, ou não atingindo as propriedades desejadas, quando o resfriamento é brando.

Os principais fluidos ou meios de resfriamento são as soluções aquosas, somente água, óleos (podendo variar a viscosidade), ar e vácuo. (CHIAVERINI, 1986)

2.4.1.1 *Têmpera*

De acordo com Chiaverini (1986, v.2, p.245) é este o tratamento térmico mais importante dos aços, principalmente os que são utilizados em construção mecânica.

A esse respeito, é preciso considerar que:

“O resfriamento é muito rápido, para o que se empregam geralmente meios líquidos, onde as peças são mergulhadas depois

de aquecidas convenientemente. Resultam, nos aços temperados, modificações estruturais muito intensas que levam a um grande aumento da dureza, da resistência ao desgaste, da resistência a tração, ao mesmo tempo em que as propriedades relacionadas com a ductilidade sofrem uma apreciável diminuição e tensões internas são originadas em grande intensidade.” (1986, v.2, p.245)

2.4.1.2 Revenimento

Aplicado em aços temperados, podendo ser aplicado logo após a peça atingir temperatura ambiente devido ao resfriamento da têmpera. No revenimento, o material é aquecido em temperatura inferior a “zona crítica”, alterando algumas propriedades obtidas no processo de têmpera, como o alívio das tensões internas e aumentando a ductilidade. (CHIAVERINI, 1986)

2.5 DUREZA

A dureza de um material é um conceito relativamente complexo de se definir, dada as diferentes interpretações que lhe podem ser atribuídas. Em princípio, pode-se afirmar que a dureza significa resistência a deformação permanente. (CHIAVERINI, 1986).

Segundo Chiaverini (1986, v.1, p.134), há diversas definições arbitrárias, que podem inclusive, servir de base para os ensaios de dureza, algumas delas são:

- Resistência à penetração;
- Absorção de energia sob cargas dinâmicas;
- Resistência à ação do risco;
- Resistência à abrasão;
- Resistência ao corte.

Dentre as definições mostradas, a de maior importância para um engenheiro, ainda que na prática, a resistência a abrasão e a resistência ao corte correspondem a características dos materiais o qual é fundamental. (CHIAVERINI, 1986).

A determinação da dureza de um material constitui um

método rápido e não destrutivo que permite avaliar as condições de fabricação e tratamento das ligas metálicas. As diferenças estruturais locais e a influência de elementos de liga, embora não sirvam como parâmetro para o projeto de peças, existe uma correlação com razoável aproximação de algumas propriedades mecânicas, como por exemplo, resistência à tração e resistência ao impacto, particularmente no caso dos aços. (CHIAVERINI, 1986).

Os ensaios de dureza de um material são baseados no princípio de penetração na superfície do metal, que ocorre com aplicação de uma carga por intermédio de um penetrador. (CHIAVERINI, 1986)

2.5.1 Ensaio de dureza Rockwell

É considerado o processo universalmente mais utilizado devido a sua facilidade de execução, rapidez na leitura obtida, isenção de erros pessoais, é capaz de distinguir pequenas diferenças de dureza em aços temperados e também porque as impressões obtidas apresentam pequenas dimensões, de modo que a peça acabada e pronta para fazer o serviço possa ser ensaiada antes sem causar danos à superfície. (CHIAVERINI, 1986).

Ligas muito duras podem ser ensaiadas no método Rockwell, devido ao seu penetrador possuir ponta de diamante, sendo que o valor obtido de dureza nesse método é número proporcional à profundidade (CHIAVERINI, 1986).

No quadro 2, vemos as configurações de medidas de dureza para cada uma das escalas rockwell.

Quadro 2 – Configurações de indentadores e carga na dureza Rockwell

Escala	Indentador	Carga Preliminar (kgf)	Carga principal (kgf)	Carga Total (kgf)
A	Cone de Diamante	10	50	60
B	Esfera de aço 1/16"	10	90	100
C	Cone de Diamante	10	140	150
D	Cone de Diamante	10	90	100
E	Esfera de aço 1/8"	10	90	100
F	Esfera de aço 1/16"	10	50	60
G	Esfera de aço 1/16"	10	140	150
H	Esfera de aço 1/8"	10	50	60
K	Esfera de aço 1/8"	10	140	150
L	Esfera de aço 1/4"	10	50	60

Fonte: Manual de instruções INSTRUTHERM: durômetro de bancada.

De acordo com Chiaverini (1986), dentre as escalas mostradas acima, há três faixas de dureza Rockwell que são mais utilizadas industrialmente:

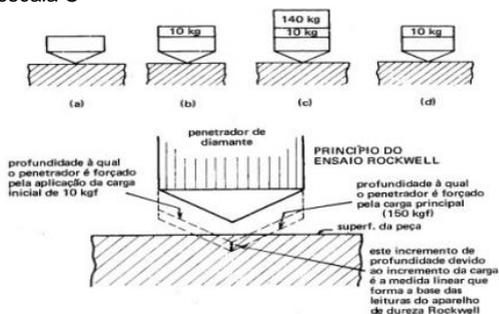
- Escala Rockwell A, para materiais muito duros, em que o penetrador possui ponta de diamante em forma de cone com ângulo ao vértice de 120° e a carga é de 60 kg;

- Escala Rockwell B, para materiais de dureza média, na qual se usa como penetrador uma esfera de aço de 1/16" de diâmetro e uma carga de 100 kg;

- Escala Rockwell C, para materiais mais duros, como por exemplo, aço temperado, na qual se emprega com penetrador ponta de diamante e carga uma de 150 kg.

O processo de penetração é muito simples e sua seqüência esta ilustrada na figura 1.

Figura 1 - As várias fases de aplicação no método de dureza Rockwell, ilustradas para escala C



Fonte:Chiaverini, 1986.

A figura 1 mostra as partes principais de um equipamento para medição de dureza na escala Rockwell, são elas:

(a) O penetrador é colocado em contato com a superfície da peça;

(b) Em seguida aplica-se a carga inicial de 10 kg, então se coloca o ponteiro do mostrador da máquina no ponto básico de referência (100 para escalas em C);

(c) Aplica-se, a carga maior de 140 kg correspondente á escala adotada, de modo a obter penetração desejada e a carga é mantida até o ponteiro do mostrador parar;

(d) A carga é então removida de modo a permitir a recuperação elástica, sendo mantida a carga inicial de 10 kg;

(e) A determinação da dureza de um material é de extrema importância para a engenharia, a fim de estarem sempre pesquisando e analisando as condições de fabricação, de utilização em determinado processo, de reações em tratamento térmico e para uniformidade de materiais. (CHIAVERINI, 1986).

2.6 TÉCNICAS EXPERIMENTAIS DE ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Até os dias de hoje, cientistas e engenheiros profissionais da área de materiais utilizam instrumentos para auxiliarem à serviços de estudo e na busca para entender melhor o comportamento dos materiais através de sua microestrutura, da presença de defeitos e outros recursos e características específicas da estrutura interna do material. (SMITH, 2012; HASHEMI, 2012)

Esses instrumentos revelam dados sobre composição interna e estrutura do material sobre várias escalas e comprimentos que vão desde o micro ao nano. A utilização destes instrumentos possibilita estudar a estrutura dos grãos, os contornos dos grãos, várias fases, defeitos de linha, defeitos na superfície e seus efeitos sobre o comportamento do material.

Técnicas de metalografia óptica são utilizadas para estudar características e a composição interna dos materiais podendo chegar a nível micrométrico (nível de aumento em torno de 2.000 X). (SMITH, 2012; HASHEMI, 2012)

Dados qualitativos e quantitativos com respeito à tamanho e contorno de grãos, presença de várias fases, danos internos e defeitos podem ser alcançado através da técnica de metalografia óptica.

Nesta técnica, a superfície onde será feito amostra de um material metálico ou cerâmico deve ser preparado por meio de um procedimento específico e demorado. O processo de preparação inclui consideráveis estágios de lixamento (geralmente quatro) com finalidade de remover da amostra grandes arranhões e finas camadas plasticamente deformadas (SMITH, 2012; HASHEMI, 2012)

Em seguida o lixamento continua com polimento (geralmente quatro) fazendo a remoção dos riscos finos formados e deixados pelo estágio de lixamento. Vale ressaltar que a qualidade da superfície é de alta importância para o resultado, sendo esperada uma superfície lisa como um espelho sem nenhum risco para poder dar continuidade do procedimento e também para minimizar o contraste topográfico.

A superfície polida e então colocada uma solução química de “ataque”, sendo muito importante a escolha do ataque e o tempo, ou seja, o intervalo de tempo no qual a peça continue em contato com ataque químico, são dois fatores cruciais que dependem do material específico em estudo. (SMITH, 2012; HASHEMI, 2012)

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para executar o procedimento de têmpera da amostra a ser analisada foi necessário seguir um passo a passo de etapas a serem cumpridas, foram elas:

- Fabricação da pastilha;
- Tratamento térmico de têmpera;
- Tratamento térmico de revenido;

- Teste de dureza rockwell C (HRC);
- Técnica experimental para identificar microestrutura.

3.1 FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS

Na fabricação da pastilha, o material é entregue em barra laminada de material aço SAE D2 com diâmetro de 1¼” (aproximadamente de 57,15 milímetros), e então através de um processo de usinagem é fabricada a peça no formato e dimensões especificadas no desenho técnico da pastilha. A usinagem foi realizada em um torno CNC de três eixos modelo Feeler FTC 350 XL.

Figura 2 - Usinagem da pastilha



Fonte: Do Autor.

Na figura 2, podemos acompanhar a fabricação da pastilha presa a uma placa de um torno CNC, sendo feita a furação utilizando fluido adequado para operação e ferramentas de furação fixadas ao torno, as ferramentas de furação e usinagem são trocadas automaticamente conforme programação feita no equipamento.

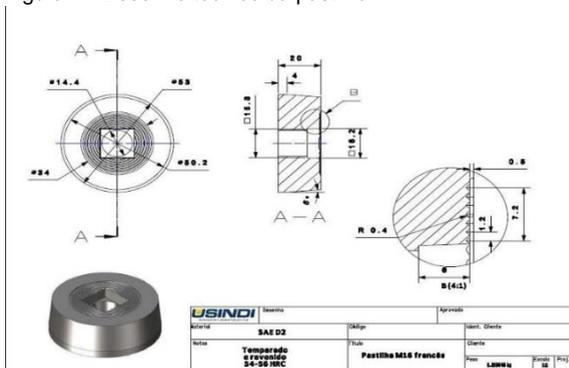
Figura 3 - Painel de programação do torno CNC



Fonte: Do Autor.

Na figura 3, mostramos o painel do torno CNC, onde é possível ter todo o controle do procedimento e tolerâncias dimensionais, é importante também acompanhar o programa em processo para qualquer eventualidade ou mudança desejada.

Figura 4 - Desenho técnico da pastilha



Fonte: Do Autor.

Foi também verificado o desenho (Figura 4) da peça de fabricação, de acordo com a peça real sendo medida com auxílio de um instrumento de medição chamado paquímetro. Conforme mostra a figura 5, feito a verificação do dimensional das amostras.

Figura 5 – Verificação dimensional da peça

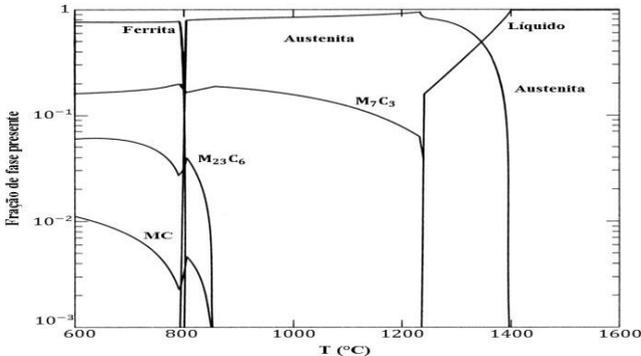


Fonte: Do Autor.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

A temperatura de têmpera foi determinada a partir do gráfico de gradiente de fase do aço SAE D2 (Figura 6), considerando a gradiente de austenita presente em aços endurecidos.

Figura 6 - Fases presentes em equilíbrio em um aço D2 em função da temperatura



Fonte: Do Autor.

As peças foram identificadas de forma simples para facilitar na diferenciação e também feitas uma argola para manipular a peça no forno com maior segurança e rapidez. Cada marcação tinha sua temperatura já estabelecida para têmpera.

Figura 7 - Peça em preparo para por no forno



Fonte: Do Autor.

Na figura 7, é apresentada a amostra sendo preparada para introduzir no forno de forma que fosse fácil retirar ela do mesmo. Logo em seguida foi providenciada uma caixa com tampa para por a peça dentro durante a têmpera, nesta caixa seria colocado carvão vegetal moído a fim de criar uma atmosfera que evite a descarbonetação do material. A peça ficou mergulhada nesse carvão dentro da caixa, esse procedimento evita problemas como amolecimento da superfície do material devido a oxidação na superfície da peça.

Figura 8 – Preparação para têmpera



Fonte: Do Autor.

Na figura 8, vemos a caixa com carvão vegetal e na outra imagem o modelo do forno utilizado para a prática experimental. O forno utilizado para têmpera possuía em sua configuração uma ferramenta para salvar a temperatura desejável, então quando o forno atingiu a 16 temperatura desejada e a peça é colocada dentro, e devido à entrada de ar durante a abertura da porta e a pastilha estar em temperatura ambiente (inferior à temperatura interna do forno), a temperatura do forno começa a baixar. É necessário que a temperatura estabilize novamente conforme a figura 9, para que possa ser contada a permanência de têmpera por uma hora.

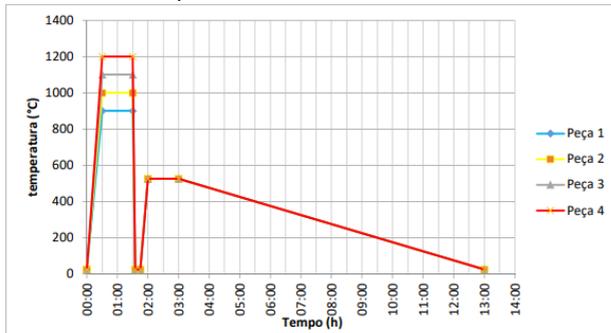
Figura 9 - Imagem mostra as temperaturas estabilizadas de cada amostra no tratamento de têmpera



Fonte: Do Autor.

Este teste tinha como principal função variar as temperaturas de têmpera do material, então foi usado quatro temperaturas diferentes: começando com 900°C, 1000°C, 1100°C e 1200°C. Foi utilizado um gráfico feito pelo Excel, para poder entender e analisar como ficaria o comportamento de cada peça a ser temperada e revenida antes do procedimento, conforme mostrado na figura 10, logo abaixo.

Figura 10 - Gráfico de variações de temperatura das amostras a serem tratadas termicamente e depois revenidas



Fonte: Do Autor.

Depois das etapas de aquecimento e manutenção de temperatura das peças, as mesmas foram resfriadas em óleo RW23 (figura 17), específico para têmpera. Esse processo ocorre devido a necessidade de qualidade do material, o resfriamento a óleo possibilita a facilidade de resfriamento da superfície até o centro da peça devido a viscosidade do fluido e ainda diminui a possibilidade de trincas devido ser um

resfriamento um pouco mais brando à quando realizado em soluções aquosas ou na própria água. Conforme foi temperada uma peça de cada vez, então era retirado do forno e em seguida já mergulhado em um recipiente contendo o óleo para resfriamento conforme figura 11. A peça ficava ali por alguns minutos e em pouco tempo ela já estava em temperatura ambiente pronta para próxima etapa. Foto abaixo mostra o recipiente utilizado para resfriar o material.

Figura 11 - Flúido de resfriamento, óleo RW23

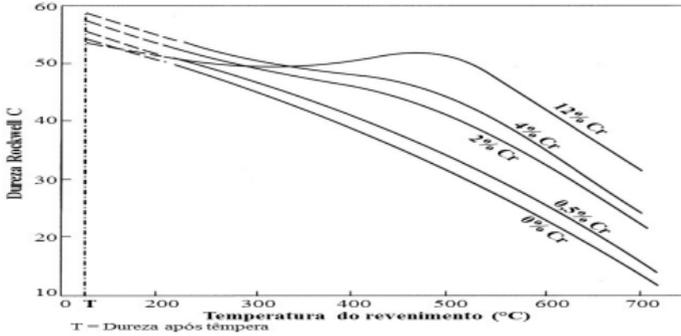


Fonte: Do Autor.

3.3 REVENIDO

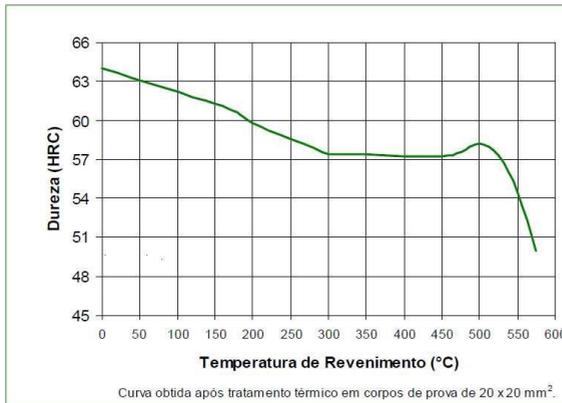
Logo após as peças serem temperadas e resfriadas à óleo, iniciou-se a etapa de revenimento, que tem sua função de aliviar as tensões geradas pela têmpera e também por processos de usinagem do material, corrigir sua tenacidade e dureza excessiva. O revenimento (ou apenas revenido) é aplicado nos aços temperados, ocorre em um processo parecido com a têmpera que funciona da seguinte forma: a temperatura do revenido foi determinada a partir de uma “média” da curva de revenimento fornecida no site do fabricante do aço (Figura 13) e curva de revenido “Temperatura X Teor de cromo na composição do aço liga” (Figura 12).

Figura 12 - Temperatura X dureza, em relação ao teor de cromo Fonte: SILVA; MEI, 2010. p. 289 e p. 292



Fonte: Silva; Mei, 2010. p. 289 e p. 292.

Figura 13 - Curva de revenimento SAE D2



Fonte: Villares Metals, 2003. p. 2.

Para a dureza especificada no desenho técnico da peça (54-56 HRC), está em torno de 525°C de acordo com o teor de cromo na composição do material (Figura 14) e a curva de revenido do aço SAE D2 determinada pelo fabricante do aço.

Figura 14 - Certificado de qualidade aço SAE D2

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2670 94930-652 - CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 1770103446				CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 575365 / 005			
CLIENTE / CUSTOMER USINDI MONTAGEM E MANUTENCAO LTDA									
Produto / Product ACO AISI/D2 DESC RED 57.150X 2.000 (1 PC)		I.L. M54413		Nota Fiscal / Invoice 575365		Data / Date 13/05/2019			
OC TB7143		IC 39.360		Peso / Weight (Kg) 39.360		Corridos / Heat 4854721			
Composição Química / Chemical Composition									
C	SI	MN	P	S	CR	MO	V	NI	CU
1.5300	0.3500	0.2600	0.0290	0.0510	11.6100	0.7800	0.7900	0.2300	0.0500
N2	BI	N	AL	SN	PB	SB	TI	HE	CO
				0.0050			0.0080	0.0100	0.0300
Teor de Cromo									
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza Hardness	Limite Resistência Tensile Strength	Limite Escoramento Yield Point	Alongamento Elongation	Estricção Reduction of Area	Tam. Grão Austenítico Austenitic Grain Size	Grau Esferoidização Degree of Globularizing			
HBW	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
225									
Observações / Observation W=0.03 B=0.0005					GELSON JUNHO Controle de Qualidade Quality Control				
CÓPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL									
CACHOEIRINHA 9 DE SETEMBRO DE 2019									

Fonte: Do Autor.

Após determinada a temperatura para revenido, o forno é aquecido até a temperatura desejada, neste caso 525°C, conforme vemos na figura 15.

Em seguida foram colocadas todas as peças tratadas dentro do forno, sem nenhum recipiente, de forma que fiquem livres uma das outras e que facilite a retirada depois do procedimento.

Quando o forno estabilizou a temperatura novamente, devido a ter colocado as peças frias no forno, foi marcado o tempo. A partir desse momento que é considerado a permanência de temperatura para revenimento de uma hora, após isso o forno é somente desligado e sem abrir a porta é deixado resfriar lentamente até a temperatura ambiente, levando cerca de oito horas. No site do fabricante, solicita tempo mínimo de duas horas totais.

O comportamento relacionado à temperatura e tempo de revenimento já foi mostrado juntamente nos gráficos de têmpera do material.

Figura 15- Imagem apresentada à esquerda mostra as amostras no forno para revenimento. Na imagem apresentada à direita mostra a temperatura de revenimento estável



Fonte: Do Autor.

3.4 ENSAIO DE DUREZA

Os testes de dureza foram realizados através de um durômetro microtest 737, um equipamento que possui facilidade de leitura dos dados obtidos. Foram utilizados indentador cônico de diamante, com pré-carga de 10kg e carga principal de 140kg, de acordo com a escala Rockwell C (HRC), padrão utilizado em aços temperados e com sua dureza elevada, como matrizes para trabalhos em conformação a frio, por exemplo.

Foram três medições em locais diferentes da superfície de cada amostra (pastilha), a fim de analisar alguma diferença que este ensaio não destrutivo pudesse nos mostrar. Posteriormente fizemos a média dos valores de cada peça, conforme tabela 3 mostrado na parte de resultados e análises.

Obedecendo aos procedimentos de ensaio de dureza Rockwell c (tabela 2), primeira carga aplicada com 10 kg e depois com mais 140 kg, assim foram feitos os ensaios nas peças de amostra SAE D2.

3.5 PREPARAÇÃO E ANÁLISE METALOGRAFICA

Foi utilizado um instrumento de análise microscópica, disponibilizado pela faculdade UNIVINTE-FUCAP a fim de

comparar as microestruturas geradas por todas as amostras devido ao processo de têmpera e revenimento. O microscópio metalográfico aparece na figura 16.

Figura 16 – Foto apresentada à esquerda mostra o instrumento para análise de microscopia. A foto apresentada à direita mostra a peça já no local adequado para análise



Fonte: Do Autor.

O procedimento de preparo da superfície da amostra foi feito com muito cuidado, começando por uma etapa de lixamento no qual foram aplicadas quatro lixas de granulometrias 80, 120, 220, 400 mesh (Figura 17).

Figura 17 - Lixas utilizadas para lixamento e acabamento



Fonte: Do Autor.

Respectivamente, para retirada de óxidos presentes na superfície. Em seguida outras etapas de acabamento que foram realizadas com auxílio de mais quatro lixas com as respectivas granulometrias: 600, 800, 1200 e 2000 mesh (Figura 24). Assim, cada lixa foi removendo os arranhões da anterior gerando uma superfície cada vez menos rugosa, até a

obtenção de uma superfície lisa e limpa. Afim de melhorar ainda mais e facilitar a leitura do microscópio, foi utilizada massa de polimento com alumina micrométrica. Na figura 18, podemos observar as peças com parte de sua superfície polida para análise.

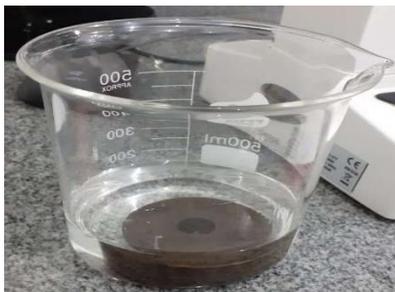
Figura 18 - Amostras com parte da superfície polida para fazer análise



Fonte: Do Autor.

A figura 19 mostra as respectivas amostras com uma pequena área se sua superfície feita um acabamento. Foi realizado um ataque químico com Nital 2% com o objetivo de retirar os óxidos superficiais e expor as bordas de grão permitindo a visualização dos contrastes entre diferentes tipos de microestrutura, conforme figura 19. O ataque químico foi feito por tempo médio de 10 segundos e depois a peça foi seca com papel toalha para realização imediata da microscopia óptica.

Figura 19 - Peça recebendo ataque de nital para análise metalográfica



Fonte: Do Autor.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Aqui apresentaremos os resultados dos experimentos realizados. Inicialmente serão verificadas as durezas adquiridas por cada peça, será analisada a influência da temperatura de têmpera sobre a dureza final das peças. Ainda será mostrada a influência da têmpera sobre a microestrutura e as propriedades mecânicas e físicas do aço estudado. E por fim, com base nos dados obtidos, foi determinada uma equação de temperatura de têmpera em função da dureza HRC, para aço SAE D2 revenido a 525°C.

4.1 DUREZA

Foram feitas três medidas de dureza em cada uma das quatro amostras de pastilha. Na tabela 1, temos os valores obtidos em cada uma das três medições de dureza, e na coluna mais à direita temos a média arredondada para números inteiros. Na figura 20 apresentam os testes de dureza Rockwell C nas quatro peças preparadas através dos processos térmicos de têmpera e revenimento.

Figura 20 – Imagem dos resultados dos testes de dureza das pastilhas



Fonte: Do Autor.

Tabela 1 - Dureza obtida com as diferentes temperaturas

Durezas obtidas de acordo com a temperatura						
Amostra	Temperatura (°C)		Durezas obtidas (HRC)			Média (HRC)
	Têmpera	Revenido	1ª	2ª	3ª	
1	900	525	18	19	20	19
2	1000	525	20	20	20	20
3	1100	525	40	40	39	40
4	1200	525	55	53	54	54

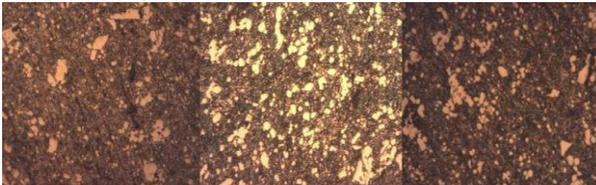
Fonte: Do Autor.

A partir das informações coletadas nos teste de dureza, montou-se a tabela 1, da qual serão utilizados os dados para a elaboração da equação da dureza em função da temperatura no processo de têmpera. Na tabela também visualizamos que das quatro temperaturas utilizadas, somente o tratamento térmico de têmpera a 1200°C atingiu a dureza solicitada no desenho técnico da peça. No entanto todos os dados obtidos nos experimentos contribuíram na determinação da equação da dureza em função da temperatura.

4.2 MICROESTRUTURA

Foram realizadas análises micrográficas com microscópio óptico trinocular invertido metalográfico com o objetivo de verificar a formação das fases metaestáveis características dos materiais que passam pelos tratamentos térmicos de têmpera. Conforme o diagrama TTT característico do aço ferramenta D2 devem ser observadas as formações de austenita e M₂₃C₆.

Figura 21: Imagem comparativa das microestruturas das amostras



Fonte: Do Autor.

Conforme a figura 21, a imagem à esquerda mostra comportamento microestrutural da amostra 2 (sendo temperada a 1000°C e apresentando dureza de 20 HRC). A imagem do meio mostra comportamento microestrutural da amostra 3 (sendo temperada a 1100°C e apresentando dureza de 40 HRC). A imagem à direita mostra comportamento microestrutural da amostra 4 (sendo temperada a 1200°C e apresentando dureza de 53 HRC).

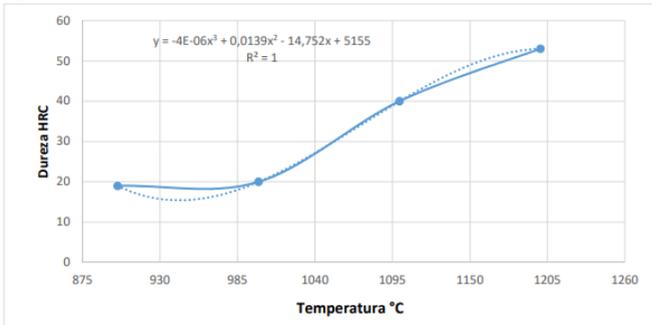
Observa-se conforme as micrografias apresentadas, que com o aumento da temperatura de têmpera ocorrem dois fenômenos: refinamento dos grãos e o aumento da quantidade de austenita e M23C6 sobre a superfície das amostras.

Os dois efeitos em conjunto contribuem para o aumento da dureza superficial já que a diminuição do tamanho médio de grão aumenta a quantidade de energia na borda de forma expressiva, bem como materiais do tipo austenita e carbonetos metálicos apresenta dureza muito superior a ferrita. “Os carbonetos de bainita inferior formam-se no interior das placas e se apresentam muito mais finos que os da bainita superior.” (apostila de Ciência e Tecnologia dos Materiais - BORTOLUZZI, 2016, p. 15). A dureza da bainita superior se aproxima muito da martensita (em torno de 50 a 60 HRC). Isso ocorre a partir de 1100°C.

4.3 ELABORAÇÃO DO GRÁFICO DA EQUAÇÃO TEMPERATURA X DUREZA

A partir Tabela 1, foram coletados os dados e informações necessárias, e com ajuda do software Microsoft Excel foi elaborado um gráfico, com uma linha de tendência, da qual se obtém, uma equação da variação da dureza em função da temperatura para têmpera do aço SAE D2, ilustrado figura 22.

Figura 22 - Gráfico temperatura (°C) x dureza (HRC)



Fonte: Do Autor.

Com os dados coletados na tabela chegamos ao gráfico acima, e a partir da linha de tendência gerada no gráfico, chegamos em um equação de grau 3, logo abaixo na equação 1:

$$y = (4 \cdot 10^{-6}) x^3 + 0,0139 x^2 - 14,752x + 51,55 \quad \text{Equação 1}$$

Agora, para determinarmos a temperatura na têmpera do aço SAE D2, nas mesmas condições aplicadas, basta analisar no gráfico qual temperatura coincide (na linha da equação) com a dureza desejada. Caso, necessite de dados mais precisos que o gráfico, utiliza-se a equação. Como a variável de grau 3 está na escala micro (10^{-6}), não intervirá significativamente nos resultados. Então, para facilitar os cálculos, caso sejam feitos manualmente, eliminamos a variável de grau 3, restando uma equação de grau 2 (Equação 2). Nesta equação 2 de segundo grau, basta resolvermos pela equação de Bhaskara, onde obteremos duas raízes, uma positiva e outra negativa. Logo descartamos o valor menor que zero, e a raiz positiva é a temperatura para aquecimento da peça na têmpera.

$$y \cong 0,0139x^2 - 14,752x + 51,55 \quad \text{Equação 2}$$

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu aplicação prática dos conhecimentos de matérias importantes no currículo da engenharia mecânica, como métodos de fabricação, ciência e tecnologia de materiais, metodologia científica, fenômenos de transporte e várias outras matérias correlacionadas com o conteúdo aqui apresentado.

Ficou claro neste trabalho que é possível aumentar significativamente a dureza superficial de aços ferramenta como o D2 através dos processos de tratamento térmico de têmpera e revenimento, chegando muito próximo ou até ultrapassando o objetivo industrial para matrizes de estampagem de parafusos do tipo francês M16.

Foi possível definir através do aumento gradual da temperatura de têmpera uma equação que descreve de forma empírica a dureza final superficial da matriz tratada através dos procedimentos aplicados. Concluímos desta forma que a equação atende ao objetivo de tratamento térmico para obtenção de durezas dentro da faixa necessária para a produção de matrizes de aço D2 sendo possível escolher a temperatura de têmpera conforme a dureza requerida e a aplicação da equação matemática que relaciona empiricamente as duas grandezas.

REFERÊNCIAS

BRAGA, Cíntia. **Análise da dureza e microestrutura dos Aços Aisi D2 E Aisi D6 submetidos a tempera convencional e tratamento criogenico**. TCC. – Engenharia dos Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: estruturas e propriedades das ligas metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

DIGGES, Thomas G.; ROSENBERG, Samuel J.; GEIL, Glenn W. **Heat treatment and properties of iron and steel**. National Bureau of Standards Monograph, novembro, 1966.

FLYNN, Barbara B.; SAKAKIBARA, Sadão; SCHOROEDER, Roger G.; BATES; MORRIS, Willian T. The Impact of Just-in-Time Manufacturing and Its Infrastructure on Manufacturing. **Management Science**, v. 43, n. 9 (Sep., 1997), pp. 1246-1257.

FLYNN, Barbara B.; SAKAKIBARA, Sadao; SCHOROEDER, Roger G.; FLYNN, E.J. Empirical research methods in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 9 n. 2, pp. 250-284, April 1990.

GAHR, KARL-H. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series. São Paulo: Elsevier, 1987.
MATHEWS, P. G. **Design of experiment with minitab**. Milwaukee: American Society for Quality, 2004.

MENDES, M. A. R. Santana. **Estudo do desgaste de ferramentas com e sem revestimento de filmes finos utilizadas em operações de conformação a frio**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

SANTOS, M. Ribeiro. **Processos alternativos de recalque da cabeça de parafusos sextavados**. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas gerais, 2006.

SILVA, Sílvio E. T. P. **Análise das propriedades mecânicas e estruturais do aço sae 4140 submetido a tratamento**

criogênico. Dissertação (Mestrado) - Engenharia e Ciência dos Materiais), Campos dos Goytacazes, p. 9-22, julho, 2012.

SMITH, Willian F.; HASHEMI, Javad. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais.** 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2010.

TOTTEN, G.E.; HOWES, M.A.H. Distortion in Heat-treated Components. *In: Steel Heat Treatment Handbook.* VAN BLACK, Lawrence Hall. **Princípios de ciência dos materiais.** São Paulo: Blucher, 1970.

YOSHIDA, S. **Seleção de aços, tratamentos térmicos e engenharia de** superfícies para ferramentas de conformação de metais. Congresso de Corte e Conformação, São Paulo, SP, 2001.

ESTUDO DA TEMPERATURA DE PRÉ-AQUECIMENTO NA MICROESTRUTURA DO AÇO SAE 1060 SOLDADO PELO PROCESSO SMAW

Guilherme Felácio Tavares¹

Laiany Cardoso de Souza²

Derek Manoel Luup Carvalho³

Rodolfo Lucas Bortoluzzi⁴

Resumo: O processo de soldagem é de extrema importância para união permanente de peças industriais, muito utilizados no setor de metalurgia. Consiste na união de peças metálicas com o objetivo de produzir ligações químicas entre os átomos da junta, para gerar as forças de atração que as manterão unidas. Pelo fato de utilizar diversas técnicas específicas durante a execução, aliado as altas temperaturas empregadas, podem ocorrer mudanças nas características do metal no local da união. Um destes processos é o de soldagem manual a arco elétrico (sigla em inglês SMAW). Aços alto carbono são aqueles que possuem uma porcentagem acima de 0,5% de carbono. Esses aços, são considerados de baixa soldabilidade, e requerem cuidados especiais em tal processo, como eletrodos com baixo hidrogênio e preparos pré solda, como processos de pré aquecimento, que visam pré aquecer o material a sofrer o processo de soldagem, de modo que a região soldada e suas proximidades resfriem de forma lenta e que não contenham altos percentuais de martensita ou bainita que são constituintes duros do aço, estes possuem alta dureza e baixa ductilidade podendo gerar fissurações durante o resfriamento. Em consequência disto, o objetivo deste artigo é analisar, as regiões que surgem após o processo de soldagem e o comportamento da microestrutura do aço SAE 1060

¹ E-mail: guilhermefelacio@hotmail.com.

² E-mail: laianybib@hotmail.com.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

⁴ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

soldado sob diferentes temperaturas pelo processo de soldagem SMAW, mantendo todos os outros parâmetros de soldagem inalterados.

Palavras-Chave: Soldagem. Ciência dos materiais. Análise microestrutural. Aço SAE 1060.

1 INTRODUÇÃO

O estudo de materiais metálicos em meio a ciência, ganha cada vez mais espaço devido a demanda do meio industrial na busca de melhores propriedades mecânicas e redução de custos.

Considerado um dos mais importantes processos de união de peças metálicas atualmente, o processo de soldagem ocorre desde aplicações mais simples, como fabricação de móveis até peças de níveis mais elevados de responsabilidade como vasos de pressão. Em ligas de aço altas liga/alto carbono, há maior dificuldade de executar a solda e existe maior risco de defeitos, o que requer medidas específicas. E o processo de tratamento térmico de pré aquecimento por exemplo, é um dos fatores que auxiliam o processo de soldagem para que não ocorram defeitos, como trincas na união das juntas. (MONDEZI. P. J, 2011). Dentre eles estão: recozimento; normalização; pré e pós aquecimento e alívio de tensões.

Segundo ESAB (2004), uma das vantagens das ligas metálicas é a alteração de suas propriedades mecânicas através de tratamentos térmicos, sem alteração da composição química.

No ato da soldagem, o pré-aquecimento consiste em introduzir uma fonte de calor adicional a peça, esta diminui a velocidade de resfriamento da junta soldada, tendo então menores tensões residuais. (Soldagem–Coleção tecnológica SENAI–1ª ed. 1997). Tratandose então de pré-aquecimento sabe-se que dependendo da composição química do metal o processo de soldagem pode ser facilitado.

Será utilizado o aço SAE 1060, que possui um elevado teor de carbono (0,55 a 0,65%), possui uma boa usinabilidade,

porém uma baixa soldabilidade. Este aço é utilizado em materiais que necessitam de resistência ao desgaste, como por exemplo: eixos, ferramentas, transmissões, rampas de arraste de cinzas pesadas, entre outros, possuindo uma boa combinação entre dureza e resistência mecânica. (Esab, Apostila de metalurgia da soldagem, 2004).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho consiste na análise da influência das diferentes temperaturas de pré-aquecimento no processo de soldagem SMAW, do aço SAE 1060 na microestrutura formada no cordão de solda e zona termicamente afetada (ZTA). Busca-se qual a melhor temperatura de pré-aquecimento para que este material possua maior resistência e assim evitem-se os problemas que possam comprometer a região soldada e suas proximidades.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar os conceitos básicos sobre os materiais e os processos empregados, bem como informações que permitam a execução de tratamentos térmicos do aço carbono SAE 1060 que será utilizado nesta pesquisa.

3.1 AÇOS

Os primeiros artefatos de ferro que se tem notícia são objetos encontrados no Egito, por volta de 2900 a.C. Fogueiras foram construídas a base de rochas de minério de ferro, a fim de promover o contato de partículas quentes de carbono com partículas de óxido de ferro, dando início ao processo de redução. Obteve-se uma massa escura, não fundida, mas permitindo a sua deformação plástica através de técnicas de

forjamento, produzindo utensílios de diferenciadas propriedades mecânicas (NOLDIN JUNIOR, 2002).

Segundo CANTO, E.L (2006), os aços são fabricados a partir do minério de ferro, que é extraído do solo, vai para um alto forno juntamente com carvão ou coque e calcário, produzindo-se o ferro gusa. Esse material apresenta uma alta porcentagem de carbono (entre 2 a 5%) portanto, muito quebradiço e com pouco uso direto. O ferro gusa é vertido diretamente a partir do cadinho do alto forno para contentores formando lingotes, ou então é levado para fornos de redução em carros-torpedo. Estes são então usados para produzir aço, ao extrair-se o carbono em excesso a partir de reações químicas. Já solidificado, se encaminha para os processos de conformação mecânica e até tratamentos térmicos deixando sua composição química conforme a necessidade de sua aplicação.

O aço carbono é basicamente uma liga de ferro e carbono, alcançando seus níveis de resistência e de dureza principalmente através de adição de carbono (Chiaverini,1996). A classificação dos aços pode ser feita conforme sua composição química e sua porcentagem de carbono (baixa, média e alta ligas de carbono). Essa classificação, porém, não é exata, pois alguns autores classificam as ligas em faixas de porcentagem um pouco diferentes de outros:

- Alto teor: Carbono maior que 0,50% C
- Médio teor: Carbono entre 0,30% e 0,50% C
- Baixo teor: Carbono menor que 0,30% C

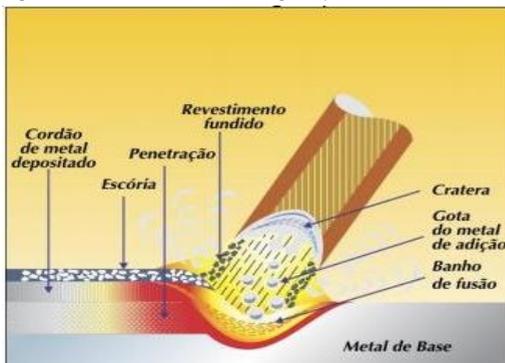
Sua classificação pode ser feita de acordo com a composição química, seguindo a norma SAE, onde os dois primeiros dígitos indicam a classe do aço (carbono comum) e os dois últimos dígitos o percentual em peso de carbono:

- Aço SAE1010 – teor de carbono 0,10%
- Aço SAE 1020 – teor de carbono 0,20%
- Aço SAE1045 – teor de carbono 0,45%
- Aço SAE1060 – teor de carbono 0,60%

3.2 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO (SMAW/MMA)

É a soldagem a arco elétrico tendo como metal de adição o eletrodo revestido (Shielded Metal ArcWelding – SMAW), que também é conhecida como soldagem manual a arco elétrico (Manual Metal Arc – MMA) (GUEDES, 2009). É realizada com o calor gerado por um arco elétrico mantido entre as partes metálicas (metal base) e a extremidade de um eletrodo metálico revestido. O calor gerado pelo arco elétrico é alto o suficiente para fundir o metal de base, a alma do eletrodo (metal de adição) e o revestimento. Quando o metal é fundido se transformam em gotas que são transferidas através do arco criado para a poça de fusão. A proteção da atmosfera é realizada pelos gases produzidos durante a decomposição do revestimento. O revestimento também forma uma camada de escória líquida que boia na poça de fusão, e tem a função de proteger o metal de solda da atmosfera enquanto ocorre a solidificação. A Figura 1 exemplifica o processo (MODENESI e MARQUES, 2000).

Figura 1 – Processo de soldagem por eletrodo revestido



Fonte: (Modenesi e Marques,2000)

Durante a realização de uma solda, a poça de fusão e as regiões adjacentes do metal base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que

se afasta do eixo central da solda. Nestas condições, pode-se esperar alterações microestruturais, em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Desta forma, em uma solda por fusão, pode-se arbitrariamente considerar a existência de três regiões básicas:

- Zona de Fusão (ZF): região onde o material foi fundido durante a soldagem e caracterizado por temperaturas de pico superiores à sua temperatura de fusão. (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): região não fundida do metal base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico são superiores a uma temperatura crítica (T_c) característica do metal base. (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012)
- Metal Base (MB): Regiões mais afastadas da solda que não foram alteradas pelo ciclo térmico. Suas temperaturas de pico são inferiores a temperatura crítica (T_c). (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012)

Figura 2 – Regiões constituintes da ZTA



Fonte: Kou, 2002.

3.3 TRATAMENTO TÉRMICO DE PRÉ-AQUECIMENTO

Segundo ESAB (2004), a grande maioria dos metais são bons condutores de calor. Porém este escoa facilmente por todo material desencadeando um resfriamento consideravelmente rápido, podendo prejudicar a região da solda devido a formação de novas microestruturas. Assim o pré-aquecimento serve para retardar seu resfriamento, evitando o surgimento de defeitos, microestruturas indesejadas, e até de trincas.

Durante a soldagem de aços de alto carbono ou de alta liga existe o perigo de que o depósito de solda e a zona termicamente afetada contenham altos percentuais de martensita ou bainita, constituintes duros do aço. Tais soldas possuem alta dureza e baixa ductilidade e podem mesmo vir a trincar durante o resfriamento. O objetivo do pré-aquecimento é manter o teor de martensita ou bainita da solda a um nível mínimo. O pré-aquecimento em geral resulta melhor ductilidade, dureza menor e menor probabilidade de fissuração durante o resfriamento. (Esab, Apostila de metalurgia da soldagem, 2004).

Segundo ESAB (2004), quanto maior for o teor de carbono do material utilizado, maior será a temperatura para o processo de pré-aquecimento, isto, também se aplica ao teor de ligas, num grau levemente menor. O efeito conjugado do teor de carbono e dos elementos de liga pode ser resumido no carbono equivalente. Assim, quanto maior for o carbono equivalente maior será a temperatura de pré-aquecimento requerida.

A tabela 3 abaixo fornece valores sugeridos de temperaturas de preaquecimento para diferentes valores de carbono equivalente:

Tabela 1- Carbono equivalente x Temp. de Pré-aquecimento

Carbono equivalente C _{eq} (%)	Temperatura de pré-aquecimento recomendada
< 0,30	opcional
0,31 - 0,45	100°C - 200°C
0,45 - 0,60	200°C - 250°C
> 0,60	250°C - 300°C
Aços ferramenta, aços mola, aços de composição desconhecida	~ 300°C

Fonte: Esab, 2004.

3.3.1 Tipos de tratamento térmico

Existem diversos tipos de tratamentos térmicos, usados para adquirir microestruturas diferentes, nesse trabalho de conclusão de curso será estudado apenas quatro tipos básicos de tratamento: têmpera, revenido, normalização e recozimento.

O pré-aquecimento reduz o risco de trincas por hidrogênio, as tensões de contração e a dureza na zona termicamente afetada. Sua necessidade aumenta também de acordo com o teor de carbono do material de base, o teor de ligas do material de base, o tamanho da peça, a temperatura inicial, a velocidade de soldagem e o diâmetro do consumível. (Esab, Apostila de metalurgia da soldagem, 2004).

O cálculo para estimar a temperatura de pré aquecimento depende do teor de carbono equivalente. Assim, primeiro, encontra-se a quantidade de carbono equivalente. Segundo o IIW (International Institute of Welding) utiliza-se as seguintes fórmulas:

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad \text{Equação 1}$$

Por fim, para determinar a temperatura ideal de pré aquecimento:

$$(\text{°C}) = 350 \times \sqrt{C_{eqTotal}} - 0,25 \quad \text{Equação 2}$$

Na soldagem a arco elétrico o aporte térmico (heat input) é definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento, também é conhecido como energia de soldagem, e é calculado pela equação:

$$E = I \times V \times v \text{ [kJ/mm]}$$

I [A] = Corrente elétrica em ampéres;

V [V] = Tensão elétrica em volts;

v [mm/s] = Velocidade linear da soldagem (mm/s)

3.4 SOLDAGEM EM AÇOS 1060

A soldabilidade dos aços carbono médio e alto carbono está bastante associada à sua microestrutura, de maneira que baixa soldabilidade pode ser indicada pela presença de trinca a frio induzida por hidrogênio. Como estão relacionadas à microestrutura na junta soldada, essas trincas são determinadas pela composição química do material. Em outras palavras, a soldabilidade é relacionada com a temperabilidade de um aço, assim, quanto maior for a temperabilidade do aço, maior a probabilidade de ocorrência dessas trincas. (Soldagem – Coleção tecnológica SENAI – 1ª ed. 1997).

Segundo Modenesi 2011, estes aços incluem as séries SAE 1050 e 1095 em que a composição do teor de carbono está entre 0,5 e 1,03% e o teor de Mn entre 0,3 e 1,0%. A soldagem destes aços necessita de cuidados especiais. Eletrodos/processos de baixo hidrogênio precisam ser usados com um pré-aquecimento entre 200 e 320°C, especialmente, para peças mais pesadas. Um tratamento térmico após soldagem (alívio de tensões ou mesmo recozimento) é usualmente especificado (como mostra a figura 4).

Tabela 2 – Exemplos de designações de aços pelo sistema SAE/AISI
Aços carbono

Nº SAE	C	Mn	P (max)	S (max)	Nº AISI
1006	0,08 max.	0,25-0,40	0,040	0,050	C1006
1010	0,08-0,13.	0,30-0,60	0,040	0,050	C1010
1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,040	0,050	C1015
1016	0,13-0,18.	0,60-0,90	0,040	0,050	C1016
1020	0,18-0,23.	0,30-0,60	0,040	0,050	C1020
1022	0,18-0,23	0,70-1,00	0,040	0,050	C1022
1025	0,22-0,28	0,30-0,60	0,040	0,050	C1025
1030	0,28-0,34	0,60-0,90	0,040	0,050	C1030
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,040	0,050	C1040
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	C1045
1050	0,48-0,55	0,60-0,90	0,040	0,050	C1050
1055	0,50-0,60	0,60-0,90	0,040	0,050	C1055
1060	0,55-0,65	0,60-0,90	0,040	0,050	C1060
1065	0,60-0,70	0,60-0,90	0,040	0,050	C1065
1070	0,65-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050	C1070
1074	0,70-0,80	0,50-0,80	0,040	0,050	C1074

Fonte: Do Autor.

3.5 ALTERAÇÕES MICROESTRUTURAIS E DAS PROPRIEDADES EM LIGAS FERRO-CARBONO (AÇOS)

O estudo do diagrama de fases é de extrema importância, por que existe forte correlação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas do material. O entendimento da microestrutura de uma liga pode ser mais bem entendido com a ajuda do diagrama de fases do material. Estes fornecem informações importantes sobre as microestruturas presentes, o processo de fusão do material, cristalização, entre outras características além de obter uma previsão das características do material, e a formação dos microconstituintes. (Willian D. Callister Jr, 2012)

3.5.1 Fases do diagrama de equilíbrio ferro-carbono

A seguir é feita uma breve revisão das microestruturas comuns presentes em ligas ferro-carbono. A figura 5 mostra o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, no qual estão previstas microestruturas em equilíbrio termodinâmico, como a ferrita, a perlita e a cementita.

Outras microestruturas comuns estão fora do equilíbrio termodinâmico, como a bainita e a martensita.

A ferrita (α) é uma solução sólida de carbono no ferro, sendo estável abaixo de 910°C. Ela é uma fase dúctil apresentando dureza e resistência mecânica baixas. (William D. Callister Jr.- 2000).

A austenita (γ) é uma solução sólida de carbono no ferro, estável a temperaturas mais altas (dependendo do teor de carbono). Também é uma fase dúctil e apresenta dureza e resistência mecânica baixas. (William D. Callister Jr.- 2000).

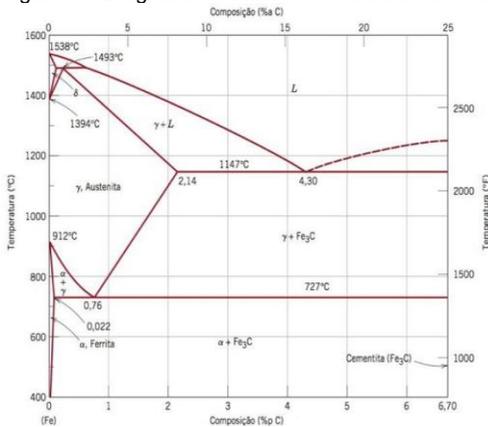
A cementita ou carboneto de ferro é uma fase frágil, apresentando dureza e resistência mecânica altas. (William D. Callister Jr.- 2000).

A perlita é uma mistura de ferrita e cementita (88% ferrita e 12% cementita). Não é uma fase, mas sim uma mistura de duas fases distintas e possui propriedades mecânicas intermediárias (dureza e resistência mecânica). (William D. Callister Jr.- 2000).

A bainita é o constituinte que se obtém na transformação isotérmica da austenita quando a temperatura do banho de resfriamento é de 250 a 500 °C. Apresenta 2 tipos de estrutura: a bainita superior de aspecto arborescente formada a 500 – 580 °C, composta por uma matriz ferrítica contendo carbonetos e a bainita inferior, formada a 250 – 400 °C, tem um aspecto similar a martensita e está constituída por agulhas alargadas de ferrita que contém placas finas de carboneto. (William D. Callister Jr.- 2000).

A martensita é uma solução sólida, intersticial, supersaturada de carbono em ferro alfa. É o constituinte estrutural da têmpera dos aços e sua microestrutura apresenta-se na forma de agulhas cruzadas. Os átomos de ferro estão como na ferrita, nos vértices. Os átomos de carbono estão nas faces e nas arestas, apresenta por isso uma rede distorcida. Esta distorção da rede é a responsável pela dureza da martensita. (William D. Callister Jr.- 2000).

Figura 3 – Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro.



Fonte: [Adaptado de BinaryAlloyPhaseDiagrams 2. ed. v. 1, T. B.Massalski (Editor-chefe), 1990. Reimpresso sob permissão da ASM Internacional, Materials Park, OH.]

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliação da influência dos parâmetros de temperatura de pré aquecimento na soldagem sobre as características microestruturais na ZTA e zona de fusão das soldas fabricadas foram realizados experimentos de simples deposição sobre chapa com préaquecimentos de 20°C, 120°C, 220°C, 320°C e 420°C. As chapas de aço SAE 1060 foram cortadas por chama óxi-combustível em dimensões de 150 mm x 75 mm x 12,7 mm, e depois de seccionadas, as amostras foram submetidas ao desbaste abrasivo para remoção de óxidos e impurezas superficiais.

Figura 4 – Chapas de aço SAE 1060



Fonte: Do Autor.

Pode-se observar na figura4 que a chapa inferior possui as dimensões de 150x75x12,7 mm e foi cortada por chama oxicom bustível como pode-se observar nas extremidades. Já a chapa superior, sofreu o processo de soldagem e foi seccionada para observação metalográfica da sua seção transversal. O processo de aquecimento foi realizado com auxílio de maçarico convencional (oxigênio+acetileno) e um termômetro laser calibrado. As operações de soldagem foram realizadas pelo método SMAW, com os parâmetros a seguir na tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros de soldagem dos corpos de prova

Máquina de soldagem	ESAB Handy Arc 130i/140i/160i
Consumível	Eletrodo revestido 3,25mm E 9018-D1
Corrente	140 Amperes
Tensão	22,5 Volts
Velocidade de soldagem	3,0 mm por segundo / 0,05 mm/min
Energia de soldagem	1000 KJ / mm
Temperatura de pré aquecimento	20°C (sem pré-aquecimento), 120°C, 220°C, 320°C, 420°C

Fonte: Do Autor.

O consumível utilizado possui um revestimento básico de baixo hidrogênio (tabela 4) para soldagem de diversos tipos de aço, especialmente os ligados a manganês 1,5% e ao molibdênio 0,40% (tabela 4). São utilizados para soldagem de tubulações de óleo e plataformas petrolíferas, vasos de pressão, recipientes e tubulações para trabalhos a baixa temperaturas, aços estruturais, etc.

Tabela 4 – Composição Química do Metal Base e Metal de adição (¹Espectrometria de emissão ótica. ²Dados do fornecedor).

	%Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo	%Cr	%Ni
Metal de base¹	Bal.	0,614	0,195	0,647	0,018	0,000	0,000	0,025	0,015
Metal de adição²	Bal.	0,060	0,300	1,400		-	0,400	-	-

Fonte: Do Autor.

A seleção da corrente de soldagem segue as recomendações do fabricante de eletrodo, como mostra a tabela 5 a seguir:

Tabela 5 – Corrente de soldagem

Classificação AWS							
Diâmetro (mm)	Corrente de Soldagem (A)						
	E XX10 E XX11 E XX10-XX	E XX12	E XX13	E XX14	E XX24	E XX15 E XX16	E XX18 E XX18-XX
1,60	--	25-40	30-50	--	--	--	--
2,00	--	40-65	40-65	--	--	--	45-70
2,50	55-75	60-85	60-85	60-90	80-120	65-90	70-90
3,25	90-130	100-130	100-130	100-140	180-225	100-130	100-140
4,00	130-160	140-180	140-180	140-180	270-320	130-170	130-190
5,00	160-200	200-250	200-250	200-250	300-340	180-230	180-250
6,00	180-220	280-350	170-350	230-300	320-360	230-300	230-310

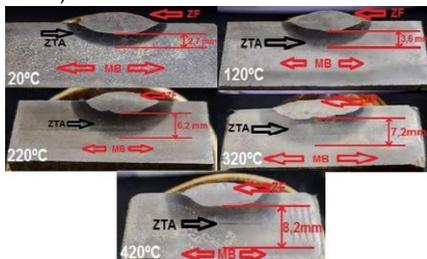
Fonte: Do Autor.

Após soldados, os corpos de prova foram resfriados até a temperatura ambiente por convecção natural, posteriormente seccionados por corte sem geração de calor (serra fita refrigerada) e preparados para o ensaio metalográfico. Utilizou-se uma politriz metalográfica, onde as seguintes granulometrias de lixa foram utilizadas em sequência: 180, 220, 400, 600, 1200 (sendo que a cada troca de granulometria de lixa, a peça foi girada em 90°). Posteriormente ao lixamento com granulometria 1200, a lixa foi retirada para então ser colocada uma boina de polimento com uma pasta de polir na politriz. Após o polimento final, a superfície da peça foi limpa e seca para ser imergido em nital 1% (1ml HNO₃ + 99ml álcool etílico). Após a imersão em nital a superfície foi lavada em água corrente e feito os seguintes registros fotográficos (macro grafias e micrografias).

4.1 MACROGRAFIAS DAS AMOSTRAS

Na figura 5 são apresentas as macrografias das amostras em função da temperatura de pré-aquecimento.

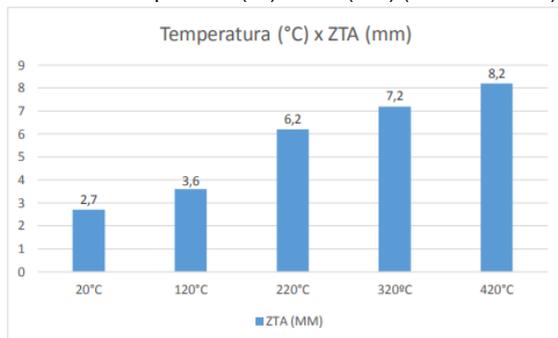
Figura 5 – Fonte do Autor. Amostra de Pré-aquecimento (20°C, 120°C, 220°C, 320°C, 420°C)



Fonte: Do Autor.

Nota-se pelas imagens de cada peça que, quanto maior a temperatura de pré-aquecimento maior foi a zona termicamente afetada (ZTA) após o recebimento do cordão de solda, reduzindo a taxa de resfriamento do material e consequentemente diminuindo a dureza da ZTA. O efeito da temperatura de pré-aquecimento no tamanho da ZTA pode ser melhor observado no gráfico abaixo (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Temperatura (°C) x ZTA (mm) (Fonte do Autor)



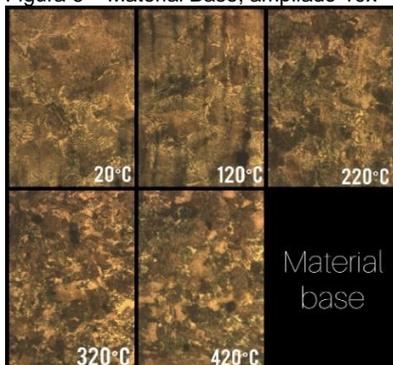
Fonte: Do Autor.

4.2 MICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS

Nesta seção é apresentado as micrografias das amostras em função da temperatura de pré-aquecimento. Na figura 6 é apresentada a micrografia do metal base, que não é alterada pelo calor da solda. Na figura 7 é apresentada a

micrografia da transição entre a zona termicamente afetada (ZTA) e a zona fundida (ZF). Por fim, na figura 8 é apresentada a micrografia da zona fundida (ZF).

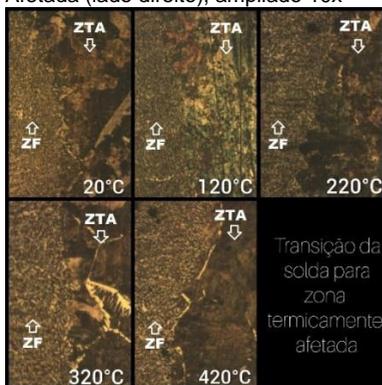
Figura 6 – Material Base, ampliado 10x



Fonte: Do Autor.

Na figura 6 podemos encontrar grãos de ferrita, perlita e cementita, porém nota-se que, nas três primeiras figuras, há estruturas perlíticas bem definidas e nas duas imagens seguintes nota-se que houve uma difusão (migração dos átomos de um local para outro menos concentrado) ocorrendo o crescimento dos grãos de ferrita.

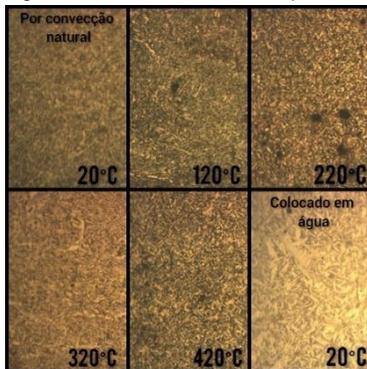
Figura 7 – Transição da Zona Fundida (lado esquerdo) para a Zona Termicamente Afetada (lado direito), ampliado 10x



Fonte: Do Autor.

É visível a mudança da microestrutura quando se trata da passagem da zona de fusão para a zona termicamente afetada. Na ZF encontramos grãos mais finos e na ZTA estes grãos se encontram maiores. Observou-se que para as temperaturas de pré-aquecimento maiores, o tamanho dos grãos na ZTA crescem, o que é indesejável já que reduz as propriedades mecânicas do cordão de solda. Assim, é desejável que a temperatura de pré-aquecimento não provoque um crescimento exagerado dos grãos, o que acontece até a faixa de temperatura de 220°C. A presença de grão no material metálico irá afetar significativamente suas propriedades. Em geral, considera-se que quanto mais fina for a granulação de um material (menor tamanho de grão), maiores serão a resistência mecânica e a tenacidade e menor a ductilidade, o que acontece na peça pré aquecida a 220°C onde os grãos possuem tamanho intermediário, aliando resistência mecânica e ductilidade.

Figura 8 – Zona de Fusão, ampliado 10x



Fonte: Do Autor.

Na figura 8, as cinco primeiras figuras apresentam características típicas da bainita, fase que possui uma dureza elevada e é similar a martensita. Porém para surgir a formação da martensita, o resfriamento da peça deveria ocorrer de forma rápida, por exemplo, após receber o cordão de solda a peça ser automaticamente colocada na água para resfriamento, e neste

18 caso as peças foram resfriadas em temperatura ambiente. Para comprovar a teoria, na última foto, utilizou-se um resfriamento rápido, ou seja, a peça após receber o cordão de solda foi submersa em água, na análise foi possível identificar a formação de estrutura martensítica.

5 CONCLUSÕES

Analisou-se que, à medida que a temperatura de pré aquecimento aumenta ao sofrer um processo de soldagem, a ZTA aumenta. Conseqüentemente a taxa de resfriamento se torna mais lenta, permitindo que a martensita ou bainita se formem em níveis mais baixos e como resultado estes níveis de dureza diminuem consideravelmente, tornando o material mais tenaz. Em relação à análise da microestrutura nota-se que na peça pré-aquecida a 220°C os grãos da ZTA se encontram mais finos, ou seja, possuindo uma tenacidade maior em relação as outras peças pré-aquecidas em outras temperaturas.

REFERÊNCIAS

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução** 5. ed. John Wiley& Sons, 2000.

CALLISTER, W. D., **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. John Wiley& Sons, 2012.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM. Esab, Apostila de metalurgia da soldagem, 2004.

GUEDES R. P. **Influência da corrente de soldagem nas propriedades de juntas de aço de alta resistência e baixa liga soldadas com eletrodo revestido**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

KOU, S. **Welding metallurgy**. Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin, Second Edition, 2002, 452p.

MODENESI, Marques. **Soldagem I: introdução ao processo de soldagem**. Belo Horizonte: 2000.

MODENESI, Marques; SANTOS L., **Introdução a metalurgia da soldagem**. Belo Horizonte, 2012.

MONDEZI. P. J. **Soldabilidade de algumas ligas metálicas**. 2011.

NOLDIN JÚNIOR, José Henrique. **Contribuição ao estudo da cinética de redução de briquetes auto-redutores**. Dissertação (Mestrado Ciência dos Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002.

PERUZZO. F.M.; CANTO. E.L., **Química na abordagem do cotidiano**. V. 1. 4. Ed. São Paulo: Moderna, 2006.

SOLDAGEM. **Coleção tecnológica**. São Paulo: SENAI, 1997.

SISTEMA DE ALAVANCAS COM BARRAS

Leonardo Gomes Goularte¹

Willian Gilberto Duarte²

Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Derek Manoel Luup Carvalho⁴

Resumo: Máquinas com sistema de alavancas na indústria de transformação são utilizadas em larga escala para produção de bens e peças. Neste artigo será utilizado um experimento com dispositivo de alavancas para validar os cálculos matemáticos encontrados na literatura. Este trabalho nos permitiu praticar e utilizar os conhecimentos profissional de engenharia adquiridos durante o curso, para o cálculo das forças do sistema de fechamento de máquinas, como alavancas tipo Toggle (alternativo) com acionamento pneumático, focando na avaliação do ganho de força e redução dos custos do equipamento.

Palavras-chave: Sistema. Alavancas. Toggle. Ganho. Força.

1 INTRODUÇÃO

O presente artigo é voltado para as definições e comportamento do sistema de alavancas tipo Toggle (alternativo) que através de relações físicas e matemáticas descritas na literatura causam aplicação de força que serão estudadas no decorrer deste trabalho. Os resultados obtidos podem levar em consideração algumas variáveis. Para introduzir o assunto primeiro são mostrados nas figuras de 1 a 4, os tipos de alavancas disponíveis para projetos de engenharia.

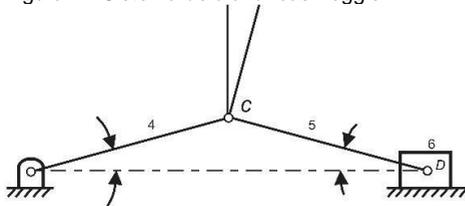
¹ E-mai: lgomesgoularte@gmail.com.

² E-mai: willian.zimba@gmail.com.

³ E-mai: rodolfo@fucap.edu.br.

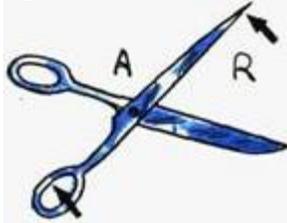
⁴ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

Figura 1 - Sistema de alavancas Toggle



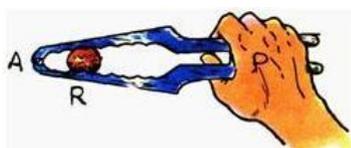
Fonte: George H. Martin.

Figura 2 - Sistema de alavancas interfixas



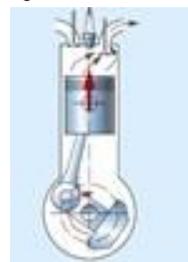
Fonte: George H. Martin.

Figura 3 - Sistema de alavancas inter-resistentes



Fonte: George H. Martin.

Figura 4 - Sistema de alavancas biela-manivela



Fonte: George H. Martin

O sistema de alavancas alternativo (Figura 1), será detalhado no Item 2.4 deste documento e será o objeto de

estudo do presente artigo.

No sistema interfixo, quando o ponto de apoio está situado entre os pontos de aplicação de força e o objeto a ser movimentado, é muito utilizado em sistemas como tesouras para cortes de vários tipos de matérias.

No sistema inter-resistente a força resistente está entre o ponto de apoio e a força potente. Os exemplos desse tipo de alavanca são quebradores de nozes e várias outras aplicações na indústria.

O sistema biela-manivela é um mecanismo que transforma movimento circular em movimento de translação, ou vice-versa. Esse mecanismo é largamente usado; sua maior aplicação é em motores de combustão interna, onde o movimento linear dos pistões causados pela explosão do combustível é transmitido para a haste que gira em um movimento circular sobre o eixo de manivela. Esse mecanismo é o ponto de partida para os sistemas que utilizam 2 o movimento de rotação de um eixo ou de uma árvore para obter movimentos lineares alternativos ou angulares. Sendo esse constituído por uma manivela, a biela, o cursor e o bloco por onde ocorrerá transformação do movimento. Este mecanismo apenas admite movimentos planos.

Diante desta breve introdução sobre os tipos de alavanca passamos a dedicar os esforços a validação da equação matemática que evidenciam um ganho de força exponencial quando utilizamos o tipo de alavanca alternativo (Toggle). Na realização deste trabalho foram aplicados os conhecimentos e conceitos teóricos adquiridos durante o curso das disciplinas como Resistências dos Materiais, Pneumática, Eletrônica, Processos de Fabricação e Elementos de Máquinas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A realização deste trabalho busca demonstrar a equação matemática que existe na literatura e descreve a aplicação do sistema de alavanca tipo Toggle. Para compreender o sistema proposto e verificar as equações

envolvidas no projeto, faremos uma revisão sobre os componentes utilizados. Iniciando por acionamentos pneumáticos que fornecerão a força motriz para o deslocamento controlado da alavanca em estudo. Aspectos sobre normas e projetos de alavancas também serão abordados.

2.1 AR COMPRIMIDO E SUAS APLICAÇÕES

Somente na segunda metade do século XIX é que o ar comprimido adquiriu importância industrial. No entanto, sua utilização é anterior a Da Vinci que em diversos inventos dominou e usou o ar. No velho testamento, são encontradas referências ao emprego do ar comprimido: na fundição de prata, ferro, chumbo e estanho. A história demonstra que há mais de dois mil anos os técnicos construía máquinas pneumáticas, produzindo energia pneumática por meio de um pistão. Como instrumento de trabalho utilizavam um cilindro de madeira dotado de êmbolo. (PARKER HANNIFIN (Brasil). Ar Comprimido. Disponível em: . Acesso em: 05 abr. 2019.)

O ar comprimido tem vasta aplicação na indústria, podendo ser utilizado como fonte de energia, item de limpeza, movimentação de materiais, etc; é um gás que não tem cor e nem cheiro, não é tóxico e nem inflamável e é abundantemente encontrado na atmosfera; daí sua elevada taxa de utilização dentro da indústria. Basicamente para sua utilização é necessário apenas um compressor, acessórios de linha e tubulações apropriadas para sua aplicação. (ATLASCOPCO, 2019)

2.2 VANTAGENS DO USO DO AR COMPRIMIDO

- É encontrado com facilidade e em grande quantidade no ambiente;
- Estando acondicionado em reservatório, é de fácil transporte e distribuição, podendo ser utilizado no momento que se queira;

- Bom funcionamento, mesmo em situações térmicas extremas;
- Sistema de filtragem torna o ar comprimido limpo.
- Eventuais vazamentos não poluem o ambiente;
- Permite alcançar uma variação de velocidades de trabalho. (PARKER HANNIFIN (Brasil). Ar Comprimido. Disponível em: . Acesso em: 05 abr. 2019.)

2.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE ALAVANCAS

O dimensionamento foi feito com base nas propriedades do aço carbono ASTM A36 (*American Society for Testing and Materials*) que apresenta características mecânicas adequadas para esta aplicação, boa soldabilidade e boa plasticidade. (ARCELORMITTAL, 2018). O Quadro 1, abaixo, mostra as principais características técnicas, aplicações e produtos que utilizam este material.

Quadro 1 - Características técnicas, aplicações e produtos ASTM36

Normas	Características	Principais Aplicações		Principais Produtos	
ASTM A36 / NBR 7007 / MR 250	Aço carbono com finalidade de utilização estrutural e em aplicações comuns.	Estruturas metálicas em geral, serralheria, passarelas, máquinas e implementos agrícolas, implementos rodoferroviários.		Cantoneira, Barra Redonda, Barra Quadrada, Barra Chata, Perfil I, Perfil U, Perfil T e Perfil Estrela.	
Propriedades Mecânicas Referencial					
Propriedades Mecânicas					
Especificação	Equivalência NBR 7007	Limite de Escoamento Min. (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento 200 mm. (%)	Alongamento 50 m. (%)
ASTM A36	MR 250	250	400–550	20	21

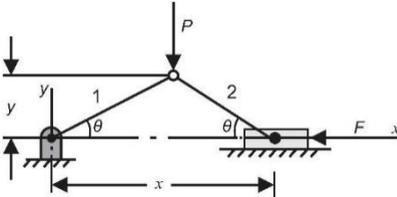
Fonte: Gerdau Aços (Brasil). Observações: São descartados os ensaios de propriedades mecânicas nas seguintes situações: 1- Perfis de área de seção transversal inferior a 645 mm². 2- Barras com espessura ou diâmetro inferior a 12,5mm (excluindo barras chatas). Nessas situações, a garantia é provida pela composição química. *Sob consulta.

2.4 SISTEMA DE ALAVANCAS COLINEARES

Admitindo que as barras 1 e 2 têm o mesmo comprimento, da análise geométrica da figura 5, verifica-se que

a relação entre a força útil e força motriz é dada pela força do cilindro pneumático dividido por duas vezes a tangente do ângulo alfa conforme equação 01, sendo que, enquanto as barras 1 e 2 tendem para a colinearidade, o ângulo θ diminui e, conseqüentemente, F tende para um valor infinito. (GEORGE H MARTIN, 2000).

Figura 5 – Diagrama de esforços de um sistema de alavancas Toggle



Fonte: George H. Martin, 2000.

$$F = \frac{P}{2 \tan \theta}$$

Equação 1

Onde:

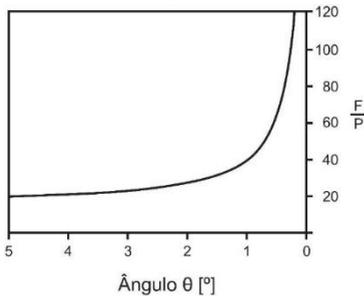
F: Força Útil;

P: Força Peso;

θ : ângulo de aplicação das alavancas.

Equação 1: Equação que descreve a força útil de uma alavanca do tipo Toggle dada uma força peso aplicada pelo atuador pneumático e um ângulo perpendicular a direção de aplicação da força peso. O gráfico 1, abaixo, mostra a relação entre o ângulo do braço da alavanca em relação ao eixo de aplicação da força peso e a relação força útil (F) por força peso (P) aplicada na alavanca. Neste gráfico, pode-se observar o desenvolvimento de uma relação do tipo exponencial entre o ângulo e a relação F/P.

Gráfico 1 - Gráfico que demonstra a relação exponencial entre o ângulo do braço de alavanca e a relação F/P



Fonte: Do Autor.

3 METODOLOGIA

Com base na literatura e conhecimentos adquiridos durante o curso aplicamos métodos empíricos (experimentação em laboratório) para obtenção das curvas de força útil X força peso quando é variado o ângulo de aplicação da alavanca, além disso será utilizada a pesquisa bibliográfica para consultar os comportamentos esperados para o tipo de alavanca estudada e as suas equações características. 6 Figura 6 - Imagem mostra relógio utilizado para verificação de deslocamento da célula de carga. Fonte: Dos autores.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi desenvolvido e montado no laboratório de engenharia mecânica da Fucap um mecanismo de alavanca acionado por um cilindro pneumático com capacidade nominal de pressão para 10 bar, a escolha da capacidade nominal do cilindro permitiu dimensionar o dispositivo e a forma de construção. Na sequência os tipos de matérias e suas características foram selecionados para permitir a estrutura resistir aos esforços aplicados. Toda a estrutura foi soldada e foram utilizados rolamentos para permitir o deslocamento das alavancas e colocados pinos para permitir a articulação do

cilindro pneumático a fim de compensar possíveis desalinhamentos. Além disso foram instaladas válvulas de comando, regulador de pressão e desenvolvido um algoritmo em C++ para realizar a coleta de dados da célula de carga responsável por indicar a força útil desenvolvida pelo dispositivo. A figura 8 mostra o dispositivo montado para o estudo proposto. O propósito da execução deste, fora a validação da fórmula matemática supracitada (Equação 1), com experimentos dentro da capacidade estrutural do nosso protótipo.

Figura 6 - Imagem mostra relógio utilizado para verificação de deslocamento da célula de carga.



Fonte: Dos Autores.

Figura 7 - Imagem mostra vista frontal do equipamento e acessórios funcionais



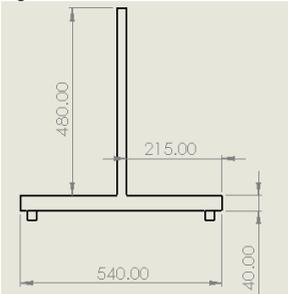
Fonte: Dos Autores.

Figura 8 - Imagem mostra vista frontal do equipamento com as barras em fim de curso.



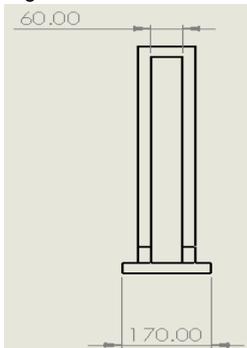
Fonte: Dos Autores.

Figura 9 – Vista frontal em CAD



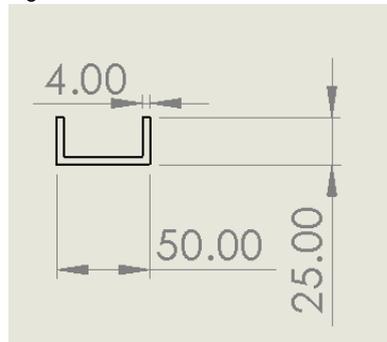
Fonte: Dos Autores.

Figura 10 – Vista frontal em CAD



Fonte: Dos Autores.

Figura 11 – Vista frontal das barras em CAD



Fonte: Dos Autores.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através da utilização do dispositivo mostrado na figura 2 foram obtidas as massas registradas por uma célula de carga modelo OMEGA LCCA-5K Inter-faceada através de um arduino UNO e um computador portátil pessoal. Os resultados obtidos têm o ângulo considerado $\theta = 0,0432$, que é o fim de curso do dispositivo. Estes resultados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - A tabela mostra a massa registrada na célula de carga dada uma variação de pressão entre 1 a 8 bar, na terceira coluna se apresenta a força útil gerada

Pressão (Bar)	Massa (Kg)	Força (N)
8	3.029,53	29.719,69
7	2.954,06	28.979,33
6	2.522,81	24.748,77
5	1.929,84	18.931,73
4	1.523,75	14.947,99
3	1.167,97	11.457,79
2	758,28	7.438,73
1	316,25	3.102,41

Fonte: Adaptado pelos Autores.

A tabela 2 mostrada abaixo mostra as forças úteis desenvolvidas pela alavanca e a força calculada através, não foi encontrado valor de Força do Experimento com ângulo superior a 2° , devido ao contato com a célula de carga não ter iniciado. Com a variação do ângulo, verifica-se o incremento de força.

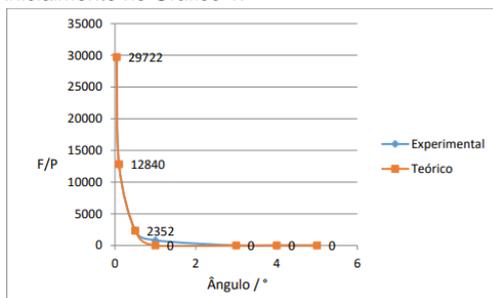
Tabela 2 - Comparação das forças observadas experimentalmente e as calculadas através da equação da alavanca Toggle.

Ângulo (°)	Força (N) Experimento	Força (N) Teoria	%
1	824	825	0,121
0,5	2.350	2.352	0,085
0,1	12.798	12.840	0,327
0,0432	29.720	29.722	0,007

Fonte: Adaptado pelos Autores.

O gráfico 2, mostra o ângulo do braço de alavanca versus a relação F/P obtida de forma experimental através da utilização do dispositivo montado e do uso dos dados gerados pelos experimentos realizados, que já foram apresentados nas tabelas 1 e 2.

Gráfico 2 - Comparativo dos gráficos dos ângulos do braço de alavanca versus a relação F/P para os dados experimentais e teóricos, conforme já havia sido previsto inicialmente no Gráfico 1.



Fonte: Adaptado pelos Autores.

Verifica-se dos dados apresentados nas tabelas 1 e 2, além do comparativo apresentado no gráfico 2 que de fato a equação proposta pela literatura para o tipo de alavanca estudado (Toggle) concorda com os dados experimentais obtidos através de um sistema criado para o estudo de alavancas como mostrado nas fotos da figura 7.

6 CONCLUSÃO

Como os resultados obtidos na prática e os desenvolvidos de forma teórica são bastante fidedignos, podemos sim validar a equação matemática, entretanto, considerando que os equipamentos como a célula de carga, arduíno e também os componentes de auxílio na linha de transmissão estão aferidos e devidamente calibrados. Todavia, como citado, os valores obtidos nos cálculos e o resultado da experiência prática são bem próximos. Contudo, vale salientar, que neste experimento, o mecanismo desenvolvido sofre

algumas deformações, não visíveis a olho nu, que não foram levadas em conta nos cálculos realizados por serem insignificantes para a execução deste.

Com a equação validada, uma das principais vantagens, é a criação de protótipos de equipamentos como prensas, extrusoras de material e afins, com escala de protótipo e com a precisão de alto índice. O tipo de mecanismo, por sua vez, pode ser também aplicado em compactadores, injetores de material, dentre outros, já que se pode com um dispositivo tecnicamente pequeno, se alcançar fatores de multiplicação de força bastante consideráveis; o que traz economia no dimensionamento e produção, ganho em espaço físico, etc.

REFERÊNCIAS

PARKER Hannifin (Brasil). **Ar Comprimido**. Disponível em: https://www.parker.com/literature/Brazil/apostila_M1001_1_BR.pdf. Acesso em: 22 ago. 2019.

GERDAU Aços (Brasil). **Produtos**. 2015. Disponível em: www.gerdau.com/br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/catalogo-barras-e-perfis.pdf. Acesso em: 27 ago. 2019.

ATLAS Copco (Brasil). **Aplicação de ar comprimido: onde é utilizado?** 2019. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/pt-br/compressors/wiki/compressed-air-articles/compressed-air-applications>. Acesso em: 24 nov. 2019.

GEORGE, H. Martin. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. 2. ed. Eua: Mc-graw- Hill, 1982.

MABIE, Hamilton H.; OCVIRK, Fred W. **Mecanismos e dinâmica das máquinas**. 10. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1967.

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE SOLDA DISSIMILAR ENTRE AÇO CARBONO E INOX PELO PROCESSO S.M.A.W.

Pedro Bertuol Santos¹
Derek Manoel Luup Carvalho²
Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Resumo: Realizado a comparação entre a soldagem feita por dois eletrodos distintos para união de materiais dissimilares, o aço-carbono (SAE 1020) e o inox (AISI 316L). O procedimento realizado consistiu de montagem dos corpos de prova, soldagem, corte das amostras em seção transversal à solda, lixamento, polimento, ataque químico e limpeza para análise microestrutural. Para caracterização das soldas, foi feita análise microestrutural do processo de soldagem com eletrodo revestido (Shielded Metal Arc Welding) utilizando metalografia. Foram analisadas as zonas termicamente afetadas, homogeneidade do cordão de solda, qualidade visual superficial e elementos formados no material após o processo. Levando em consideração apenas os comparativos realizados, foi feita a comparação entre a solda feita com os dois eletrodos utilizados, sendo que o eletrodo AWS A5.4 E 309L apresentou o melhor resultado.

Palavras-Chave: SMAW. Metalografia. Aço. Carbono. Inox.

1 INTRODUÇÃO

Aços para alta resistência a corrosão são muito utilizados na indústria como por exemplo ligas inoxidáveis. Estes são muito úteis quando em ambientes agressivos tais como: tanques de ácido, tubulações expostas à altas taxas de

¹ E-mail: pedrobertuolsantos@gmail.com.

² E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

umidade, grades expostas as condições climáticas entre uma infinidade de outras situações (CESAR NETO, 2014).

Atualmente, tem-se tornado comum misturar o aço carbono ao aço-inox para manutenção de locais que sofrem com o processo de corrosão devido a exposição ao clima, a produtos químicos e altos índices de umidade (CESAR NETO, 2014).

Tendo como exemplo a manutenção de uma plataforma com chapas de aço de baixo teor de carbono onde apenas uma pequena parte sofre com corrosão devido a gotejamentos de água sobre a mesma, não seria uma atitude financeiramente correta substituir toda chaparia por aço-inox, no entanto, bastaria recortar apenas o local oxidado e soldar uma chapa de inox no local.

É preciso tomar cuidado quanto a escolha do material de adição para que se mantenha um equilíbrio na qualidade da união destes metais.

Um dos processos de soldagem mais utilizados na indústria é o Shielded Metal Arc Welding (S.M.A.W. – conhecido no Brasil como eletrodo revestido), por ter baixo custo, ser acessível e por seu alcance em locais de difícil acesso entre outras vantagens.

Conforme Cesar Neto (2014), solda dissimilar é um dos casos de uniões soldadas que é caracterizada pela junção entre diferentes materiais, no caso, aço inox e aço carbono que são largamente utilizados em linhas de vapor em plantas de energia, em reatores nucleares e plantas petroquímicas.

O objetivo do presente artigo é realizar comparações microestruturais entre: zonas termicamente afetadas, níveis de penetração do material de adição à peça e outras análises metalográficas. Além destas também serão realizados comparativos de qualidade visual superficial do cordão de solda.

Para isto, serão utilizados dois tipos eletrodos conhecidos por sua alta resistência à corrosão e mecânica que são o UTP 68HH 2,5mm (E NiCrFe-3, norma AWS A5.11) e o AWS A5.4 E 309L 2,5mm (CSiMnCrNi, norma AWS A5.1).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O AÇO

De acordo com São Paulo (2001), aços são ligas de ferro com até aproximadamente 2,11% ~ 2,14% de carbono, podendo conter outros elementos de liga tais como Cr, Mn, Mo, V, Nb, W, Ti, Ni e outros elementos (denominados residuais, provenientes do processo de fabricação, tais como o P, S, Si).

Segundo São Paulo (2001), não se obedece a um único critério para classificar os aços, podendo existir diversas classificações as quais podem ser referentes à composição química, aplicações a qual se destinam, sua microestrutura, propriedades e ao processamento.

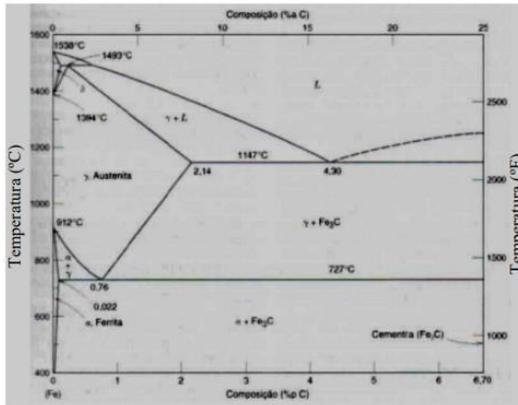
Para Longo (2017), é sempre importante ter certeza que o aço que será empregado em um projeto é o ideal, e dentre tantas variáveis de aços que surgem do processo de fabricação supracitado foi essencial que houvessem padronizações, pois cada aplicação necessita de um tipo de material, uns mais tenazes, outros podem precisar de materiais dúcteis entre várias outras possibilidades.

Atualmente as instituições normativas mais conhecidas são a SAE (Society of Automotive Engineers), AISI (American Iron and Steel Institute) e a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), as quais utilizam a composição química como forma de classificação.

Conforme Scheid (2010), a partir destas, podemos classificar globalmente os aços em quatro grandes classes:

- Aços Carbono;
- Aços Liga ou de Construção Mecânica (Baixa e Média Liga);
- Aços Inoxidáveis;
- Aços Ferramenta (Alta Liga).

Figura 1 - Diagrama de fases do sistema Fe-Fe₃C: aços (até 2,14%C) e ferros fundidos (acima de 2,14%C).



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2015.

2.1.1 Aço Sae 1020

Conforme Longo (2017), o uso do aço SAE 1020 é amplamente visto na indústria em geral por apresentar uma característica importantíssima, que é a facilidade de forjamento e boa soldabilidade devido as suas características, que aliam ótimo custo benefício.

Composição química aplicável a formas estruturais, tais como chapas, tiras, tubos soldados e placas, regido pela norma SAE J403:

- Carbono (C): 0,17% – 0,23%;
- Manganês (Mn): 0,30% – 0,60%;
- Fósforo (P): 0,030% (máximo);
- Silício (Si): 0,10% (máximo);
- Enxofre (S): 0,035% (máximo).

Longo (2017), afirma que o manganês tem a finalidade de diminuir os óxidos encontrados nos aços evitando assim a fragilização a quente ocasionada pelo sulfeto de ferro, além disso, aumenta a temperabilidade, já o silício atua se dissolvendo na ferrita e agindo como elemento endurecedor.

Temperatura (°C) Temperatura (°F).

Pandolfo (2009), cita que os aços conhecidos como baixo carbono (menos que 0,25% de carbono), quando resfriados lentamente, possuem essa constituição, ferrita e perlita sendo, portanto, aços dúcteis.

Quanto menor o teor de carbono presente, mais ferrita e menos perlita se formam, resultando, como consequência, maior ductilidade e menor dureza (PANDOLFO, 2009).

Para Pandolfo (2009), esse tipo de aço é parcialmente mole e de pouca resistência, no entanto possui ductilidade e tenacidade excepcional, além disso, é usinável, soldável e entre os tipos de aço, é um dos mais baratos a ser produzido.

De acordo com Pandolfo (2009), entre suas aplicações típicas estão os componentes de carcaças de automóveis, formas estruturais (vigas tipo “I”, canaletas e ferros angulados) e chapas usadas em tubulações, edificações, pontes e latas estanhadas.

De modo geral, o uso do SAE 1020 é recomendado para fabricação de peças as quais precisam receber tratamento superficial com a finalidade de elevar a dureza.

2.1.2 Aço Inox

Conforme afirma Magalhães (2018), o aço inoxidável é uma liga metálica a qual possui em sua composição o ferro, cromo, carbono e níquel, o que o torna altamente resistente ao calor e à corrosão.

Dependendo do tipo de aplicação, podem ainda fazer parte de sua composição, outros elementos que modificam e melhoram as suas características básicas, como o silício, titânio, nióbio, molibdênio, cobalto, boro e nitrogênio (MAGALHÃES, 2018).

Segundo Callister Junior (2008), com base na fase constituinte predominante em sua microestrutura, os aços inoxidáveis são divididos em três classes – martensíticos, ferríticos ou austeníticos.

Alguns aços inoxidáveis são empregados com frequência em temperaturas elevadas e em ambientes severos,

uma vez que resistem à oxidação e mantêm sua integridade mecânica sob tais condições (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Os aços inoxidáveis martensíticos são capazes de ser tratados termicamente, de tal maneira que a martensita é o principal microconstituente. Para os aços inoxidáveis austeníticos, o campo de fases da austenita é estendido até a temperatura ambiente. Os aços inoxidáveis ferríticos são compostos pela fase ferrita. Os aços inoxidáveis austeníticos e ferríticos são 6 endurecidos e têm sua resistência aumentada por trabalho a frio, uma vez que não são tratáveis termicamente (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Há uma enorme gama de utilidades do inox, entre elas estão: equipamentos para indústria alimentícia, peças náuticas, eletrodomésticos, componentes automobilísticos, peças de acabamento da construção civil, segmentos de cutelaria (panelas, talheres, ...) entre outros.

Magalhães (2018) afirma que o responsável por essa resistência é o cromo, que dependendo da quantidade em sua composição, quando entra em contato com o oxigênio, forma uma película protetora sobre a superfície (passivação) do aço, que os torna impermeável, este deve apresentar, no mínimo, 10,50% de cromo.

Os equipamentos que empregam esses aços incluem turbinas a gás, caldeiras de vapor para altas temperaturas, fornos para tratamento térmico, aeronaves, mísseis e unidades geradoras de energia nuclear (CALLISTER JUNIOR, 2008).

2.1.3 Aço Inox AISI 316L

“Aço cromo-níquel molibdênio, inoxidável austenítico, não-temperável, não magnético. Possui resistência à oxidação até a temperatura de 875 °C, porém a resistência à corrosão intercrystalina é garantida até a temperatura de 300 °C. A presença de molibdênio na composição química deste aço, eleva sua resistência mecânica, além de aumentar a resistência ao ataque corrosivo em meios clorados e não oxidantes” (FAVORIT - AÇOS ESPECIAIS, 2019).

Tabela 1 - Elementos de liga do aço AISI 316L.

ABNT/SAE/AISI	C máx.	Mn máx.	P máx.	S máx.	Si máx.	Ni	Cr	Mo
316 L	0,03	2,00	0,045	0,030	0,75	10,00 - 14,00	16,00 - 18,00	2,0 - 3,00

Fonte: Favorit - Aços Especiais, 2019.

2.2 SOLDAGEM

A solda pode ser definida como uma união de peças metálicas, por ação de calor ou de pressão, ou mesmo de ambos. Poderá ou não ser empregado em metal de adição para se executar efetivamente a união (EVANDRO ARMINI DE PAULI, 1996).

De acordo com Evandro Armini de Pauli (1996), os materiais de peças a serem soldadas devem ser, se possível, iguais ou, no mínimo, semelhantes em termos de composição. As peças devem ser unidas por meio de materiais de adição, também igual em termos de características, pois os materiais se fundem na região da solda.

Evandro Armini de Pauli (1996) ainda afirma que o metal de adição deve ter uma temperatura de fusão próxima àquela do metal-base ou, então, um pouco abaixo dela, caso contrário, ocorrerá uma deformação plástica significativa.

As aplicações dos processos de soldagem abrangem desde minúsculos componentes eletrônicos até enormes equipamentos e estruturas como por exemplo construção de navios, automóveis, motocicletas, trens, turbinas, aviões, bicicletas, estruturas civis entre muitas outras aplicabilidades (EVANDRO ARMINI DE PAULI, 1996).

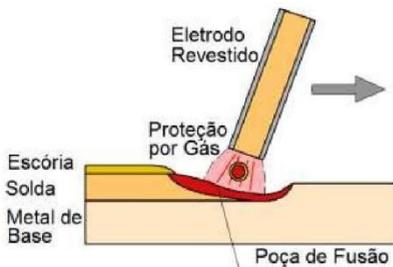
2.2.1 Processo S.M.A.W. ou M.M.A.

As siglas S.M.A.W. (Shielded Metal Arc Welding) e M.M.A (Manual Metal Arc) são referentes ao mesmo processo, onde a fusão dos metais se dá devido ao aquecimento destes através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo

revestido e a peça a ser soldada (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

O eletrodo é formado por um núcleo metálico (“alma”), recoberto por uma camada de minerais e/ou outros materiais (revestimento). A alma do eletrodo conduz a corrente elétrica e serve como metal de adição. O revestimento gera escória e gases que protegem da atmosfera a região sendo soldada e estabilizam o arco. O revestimento pode ainda conter elementos que são incorporados à solda, influenciando sua composição química e características metalúrgica (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Figura 2 – Soldagem com eletrodo revestido.



Fonte: Modenesi; Marques; Santos, 2012.

O metal a ser fundido do eletrodo é deslocado por meio de um arco elétrico até a poça de fusão no metal base, formando deste modo o cordão de solda, devido ao revestimento e as impurezas encontradas no metal base, uma escória é formada na superfície da solda, a qual uma vez solidificada irá controlar a taxa de resfriamento da junta soldada já solidificada (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

O revestimento quando com o arco elétrico aberto, gera gases que servirão para proteger a poça de fusão dos gases atmosféricos (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

Como todos os processos de soldagem, este também possui suas vantagens e limitações como cita Modenesi, Marques e Santos (2012):

- Equipamento simples, portátil e barato;
- Não necessita fluxos ou gases externos;

- Pouco sensível à presença de correntes de ar;
- Processo extremamente versátil em termos de materiais soldáveis;
- Facilidade para atingir áreas de acesso restrito;
- Aplicação difícil para materiais reativos;
- Produtividade relativamente baixa;
- Exige limpeza após cada passe de soldagem.

Em destaque está a facilidade de soldar, através deste, em condições extremas e em quase todos os lugares.

De acordo com pesquisas e com Modenesi, Marques e Santos (2012), suas aplicabilidades são:

- Soldagem de produção, manutenção e em montagens no campo;
- Soldagem de aço carbono, baixa e alta liga;
- Soldagem de ferro fundido;
- Soldagem de alumínio, níquel e suas ligas; Aços inoxidáveis.

2.2.2 Eletrodo UTP 68 HH

Tabela 2 - Propriedades do eletrodo UTP 68 HH.

Eletrodo	Elementos de liga	Propriedades mecânicas	Posições de soldagem	Diâmetro (mm)	Corrente (A)
UTP 68 HH	C- 0,03	LR>620MPa		2,50	40 – 65
	Si – 0,40	Le>390MPa		3,25	70 – 100
AWS A5.11	Mn – 5,00	A>35%		4,00	100 – 120
E NiCrFe-3	Cr – 17,00 Ni – resto Fe – 3,00 Nb – 2,00	>80j (+20°C)		5,00	130 – 150

Fonte: Voestalpine Böhle Welding Soldas do Brasil LTDA., 2018.

Eletrodo austeníticos, indicado para a soldagem de união de todos os gêneros de aços, desde os aços sem liga até os de alta liga, níquel, cobre e ligas de cobre e união entre esses diversos grupos. Dureza – 180HB. (VOESTALPINE BÖHLE WELDING SOLDAS DO BRASIL LTDA., 2018).

2.2.3 Eletrodo AWS A5.4 E 309L

“Trata-se de um eletrodo com revestimento de alta liga, tipo misto, apto para realizar “cladding” de inoxidável em aços carbono de baixa liga. Utiliza-se também na soldagem de aços de composição similar, aços tratáveis termicamente ao carbono e de baixa liga. Devido ao depósito ser de natureza austenítico-ferrítica, o mesmo apresenta resistência à corrosão em temperaturas até 400°C. O depósito é dúctil e de natureza austenítico-ferrítica, resistente ao fissuramento. Metais de base: aço Carbono e aços ligados, aptos de serem tratados termicamente para aumentar a resistência mecânica (beneficiamento), aços inoxidáveis ferríticos ao Cromo, aços austeníticos ao Cr-Ni e aço austenítico ao Manganês. Excelente para a soldagem fora de posição, exceto na vertical descendente; escória auto destacável e sem resíduos; revestimento resistente à umidade” (VOESTALPINE BÖHLER WELDING, 2019).

Tabela 3 - Propriedades do eletrodo AWS E 309L.

Diâmetros disponíveis/Amperagem					
Eletrodo - DxL (mm)	2,5 x 300	3,2 x 350	4,0 x 350	5,0 x 450	
Corrente (A)	60 - 90	80 - 120	100 - 160	140 - 220	
Posições de soldagem	Plana, horizontal, ângulo, vertical ascendente e sobre cabeça.				
Análise química do metal depositado %	C	Si	Mn	Cr	Ni
	0,02	0,70	0,70	22,70	12,50
Tipos de Corrente	CC+ ou CA				
Propriedades mecânicas do depósito	Tração = 550-700N/mm ² Escoamento = 440N/mm ² Alongamento = 30% Impacto = 39 J (+20°C) Dureza HB = ~170				

Fonte: Voestalpine Böhler Welding, 2019.

2.2.4 Zona termicamente afetada

A soldagem tem como consequência a alteração das propriedades metalúrgicas e estado de estresse do material

adjacente a junta soldada. O exorbitante calor gerado pelo arco de soldagem pode sujeitar o material circundante a rigorosos ciclos térmicos. Esses ciclos sempre modificam, em alguma intensidade, as propriedades do material base próxima à solda, formando uma heterogeneidade no aço soldado, chamada de zona termicamente afetada (ZTA). Nesta zona quando não tratada corretamente pode acarretar na fragilização do material devido a têmpera indevida localizada, efeitos como este podem vir a causar sérios problemas no em torno do cordão de solda (ROCHA, 2018).

2.3 METALOGRAFIA

Metalografia é o estudo e interpretação da estrutura interna dos materiais a partir de uma superfície preparada, e a relação dessas estruturas com as suas composições químicas, propriedades físicas e mecânicas (PAVANATI, 2019). Conforme Pavanati (2019), os objetivos da metalografia são:

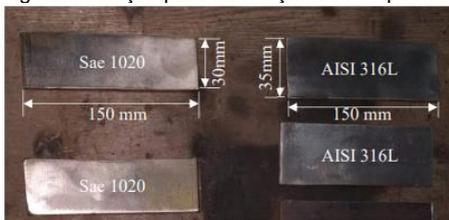
- Identificar o tipo, tamanho, local e a intensidade das descontinuidades;
- Identificar o processo de fabricação da peça;
- Identificar o tipo de tratamento térmico ou termoquímico;
- Identificar a profundidade da camada carbonetada ou descarbonetada;
- Observar e identificar zonas de alterações térmicas sofridas por soldagem;
- Observar a penetração do cordão de solda;
- Identificar as formas de grafita;
- Tamanho do grão; De acordo com Pavanati (2019) os ensaios micrográficos têm por objetivos determinar: 11
- O tipo de micro inclusão;
- A morfologia das fases presentes;
- O tipo de tratamento térmico ou termoquímico;
- A granulação (tamanho e forma);

- Os microconstituintes do material etc.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram confeccionados dois corpos de prova para cada material de adição totalizando quatro peças para estudo, todos seguindo os padrões para o processo de soldagem os quais seriam: a preparação da junta a ser soldada de forma adequada com o tipo de junção a ser empregada a qual neste caso optou-se pela junta de topo por ser a mais comumente utilizada, devida regulagem da máquina de solda de acordo com as especificações do fabricante dos eletrodos, manter os materiais de adição em estufas de soldagem garantindo que os mesmos se encontrem livres de umidade, bancada apropriada para o processo e o profissional capacitado no processo de soldagem S.M.A.W.

Figura 3 - Peças para fabricação dos corpos de prova (todas com 3mm de espessura)



Fonte: Do Autor.

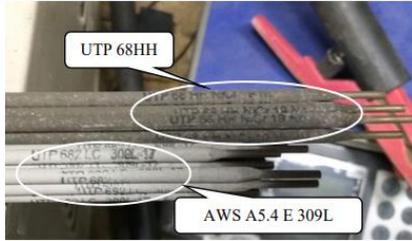
Para os materiais escolhidos é dispensado o tratamento térmico pois estes são soldáveis em temperatura ambiente.

Não foram realizados ensaios de tração, compressão, impacto e dureza.

Também não foi feito acompanhamento sobre a temperatura durante a confecção dos corpos de prova.

Feita a soldagem, todas as peças devem ser devidamente preparadas para análises micrográficas.

Figura 4 - Eletrodos utilizados para o processo



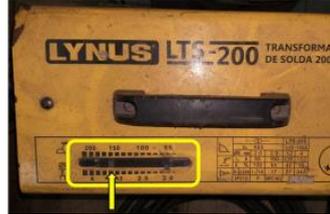
Fonte: Do Autor.

Figura 5 - Máquina de solda utilizada



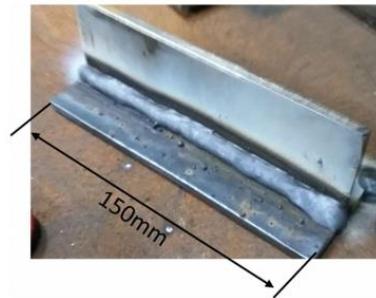
Fonte: Do Autor.

Figura 6 - Amperagem utilizada (155A)



Fonte: Do Autor.

Figura 7 - Corpo de prova soldado (antes do corte)



Fonte: Do Autor.

Foram ser realizados cortes transversais à solda nas peças para possibilitar as análises no interior do cordão de solda, nesta etapa é primordial que a peça não receba calor, para que Figura 5 - Máquina de solda utilizada. Fonte: o autor. Figura 6 - Amperagem utilizada (155A). Fonte: o autor. UTP 68HH AWS A5.4 E 309L se mantenha as características formadas pelo alta temperatura do processo de soldagem, por

isso as peças foram cortadas utilizando serra-fita de bancada e lubrificadas com água durante o corte.

Em seguida é realizado o lixamento das peças, para este processo são utilizadas as lixas d'água de grão 80, 120, 220, 400, 500, 600, 1200 e 2000 respectivamente.

Figura 8 - Direção do corte



Fonte: Do Autor.

Figura 9 - Peça cortada



Fonte: Do Autor.

Figura 10 - Politriz e lixadeira utilizada para acabamento das peças



Fonte: Do Autor.

Também é importante que as peças sejam lixadas até que sobrem apenas as marcas da última folha de lixa usada, ou seja, quando a superfície se tornar homogênea.

Sucedendo o processo de lixamento é realizado o polimento com pasta abrasiva de alumina visando remover as imperfeições resultantes dos processos anteriores.

Por seguinte é feita a limpeza da superfície a ser analisada através de ataque químico com Nital (composto de 2% de ácido nítrico e 98% de álcool etílico) para remoção de impurezas 14 residuais, o corpo de prova é mergulhado durante dez segundos na solução, retirado e limpo com papel macio.

É importante não colocar os dedos na superfície polida, pois a gordura e resíduos presentes nas mãos contaminaria a peça novamente.

Após as devidas preparações citadas acima, as peças estarão prontas para as análises micrográficas.

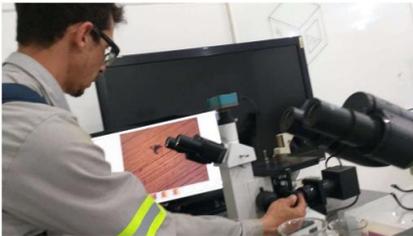
Figura 11 - Corpo de prova após ataque químico



Fonte: Do Autor.

4 ANÁLISES E RESULTADOS

Figura 12 - Microscópio metalográfico



Fonte: Do Autor.

Quanto ao aspecto visual da solda, nota-se que o AWS A5.4 E 309L se destaca por seu ótimo acabamento superficial tanto no cordão de solda quanto na vista transversal onde visualmente se une perfeitamente à chapa de inox.

Figura 13 - Cordão de solda realizado com o eletrodo UTP 68HH.



Fonte: Do Autor.

Figura 14 - Cordão de solda realizado com o eletrodo AWS A5.4 E 309L.



Fonte: Do Autor.

No caso do eletrodo UTP 68HH, tem-se uma certa dificuldade na remoção da escória e o cordão de solda fica com uma aparência fosca e mau acabada sendo necessário maior esforço na limpeza e acabamento do mesmo.

Em análise microestrutural, primeiramente com o eletrodo UTP 68HH, é possível observar grande formação de perlita na zona termicamente afetada do aço SAE 1020, esse acúmulo se diminui drasticamente conforme se distancia do cordão de solda, porém, devido à baixa espessura das chapas (3mm), tem-se um endurecimento considerável da mesma devido ao choque térmico gerado após soldagem.

Já no interior do cordão de solda, em uma região próxima ao aço SAE 1020, visualizase o que aparenta ser precipitados de carboneto originados durante o resfriamento do cordão de solda e impedem a homogeneidade estrutural do cordão.

Também na região de união do cordão à chapa de aço SAE 1020, formou-se uma abertura devido à falta de coesão

entre os materiais e com formações de carbono em determinados pontos, o que indica que esta região se tornou frágil, onde se vir a sofrer uma ruptura, este será o local.

Com isto, é perceptível a fragilidade criada na zona termicamente afetada ocasionando alto nível de endurecimento do material.

Figura 15 – Região de encontro entre o aço SAE 1020 e o cordão de solda (UTP 68HH)



Fonte: Do Autor.

Figura 16 - Diminuição da formação de perlita conforme se afasta do cordão de solda (aço SAE 1020)



Fonte: Do Autor.

Na análise com o AWS A5.4 E 309L se observa uma melhor união da liga de inox ao aço carbono SAE 1020, pois, na ZTA há menor formação de perlitas e melhor união dos Precipitados de carboneto. Formação de perlita Ferrita pró eutética materiais na linha de encontro entre estes, mantendo assim a maleabilidade da chapa nesta região.

Entretanto, a chapa de aço carbono sofreu alterações num todo devido à elevada temperatura no momento da soldagem.

Em comparação ao UTP 68 HH, a elevação da temperatura da chapa é muito maior com o 309L, é possível observar a olho nu pela mudança de cor da peça no momento da soldagem.

Outro ponto a ser observado com o 309L é a homogeneidade do cordão de solda, livre de impurezas, apenas com poucas e pequenas formações de perlita espalhadas no local.

Na região entre o cordão de solda e a chapa de aço inox, o 309L também se funde melhor do que o UTP 68HH o que é visto devido a homogeneidade e semelhança entre o cordão e a chapa de aço SAE 1020.

Porém, funde-se com menor profundidade na chapa de aço carbono do que com o eletrodo UTP 68HH.

Figura 17 - União entre o aço carbono e o cordão de solda



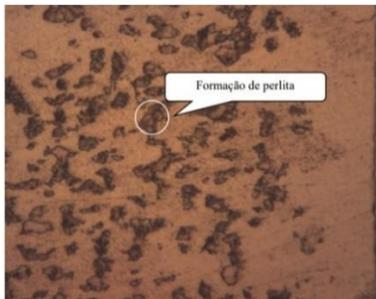
Fonte: Do Autor.

Figura 18 - Região de encontro entre o cordão de solda e a chapa de aço inoxidável AISI 306L (utilizando o eletrodo AWS A5.1 E 309L).



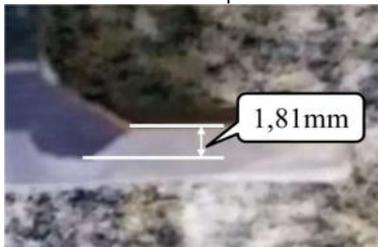
Fonte: Do Autor.

Figura 19 - Formação de perlita após processo de soldagem no aço carbono SAE 1020 (utilizando o eletrodo AWS A5.1 E 309L)



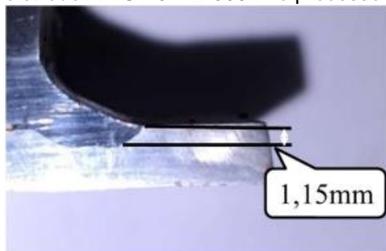
Fonte: Do Autor.

Figura 20 - Profundidade de penetração do cordão no aço SAE 1020, utilizando o eletrodo UTP 68HH no processo



Fonte: Do Autor.

Figura 21 - Profundidade de penetração do cordão no aço SAE 1020, utilizando o eletrodo AWS A5.4 E 309L no processo



Fonte: Do Autor.

A região de encontro entre o cordão e chapa de aço AISI 316L (figura 18), foi dificilmente identificada, ao encontrar a região de fusão entre o cordão e o aço SAE 1020 (figura 17) seguiu-se esta linha de encontro até chegar à chapa de inox.

5 CONCLUSÕES

Conforme análises dos corpos de prova, conclui-se que o eletrodo UTP 68 HH torna a região de união ao aço carbono mais frágil e com maior deformação tanto no cordão de solda quanto na ZTA possivelmente causado no resfriamento do material tornando necessário realizar estudos mais específicos envolvendo o tratamento térmico no processo de soldagem para assim poder definir se há alguma melhora ou não deste. Na união do cordão de solda com a chapa de aço SAE 1020, utilizando o eletrodo UTP 68HH, formou-se uma abertura considerável devido à falta de coesão entre os materiais provavelmente originada pelas dissimilaridades químicas entre os materiais e formações de carbono em determinados pontos deixando esta parte fragilizada.

Em relação ao 309L, analisando a microestrutura e aspecto visual superficial, manteve as características originais da chapa dissimilar e a homogeneidade do cordão de solda. Poucas mudanças foram percebidas na ZTA, o que faz com que este, de acordo com o presente artigo, se torne o material ideal para este tipo de união.

Para futuros trabalhos, recomenda-se uma análise mais profunda utilizando ensaios de tração, impacto, difração de raios-x, microscopia eletrônica, entre outros.

REFERÊNCIAS

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CESAR NETO, Benedito Vieira. **Comparação de junta soldada aço carbono/aço inox utilizando como metal de adição aço carbono e aço inox**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

CENTRO Federal de Educação Tecnológica de São Paulo - CEFET/SP (org.). **Informações Gerais Sobre Aços**. 2001. Disponível em: http://joinville.ifsc.edu.br/~paulosergio/Ciencia_dos_Materiais/Classificação%20dos%20aços.pdf. Acesso em: 05 jun. 2019.

FAVORIT Aços Especiais. **Aços inoxidáveis: Aço AISI 316 / AISI 316 L**. 2019. Disponível em: <http://www.favorit.com.br/produtos/acosinoxidaveis/aco-aisi-316-aisi-316-l>. Acesso em: 24 nov. 2019.

LONGO, Gabriel dos Santos. **Análise das características de um aço SAE 1020 para utilização em projetos mecânicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário Anhanguera, Pirassununga, 2017.

MAGALHÃES, Lana. **Aço Inox**. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/aco-inox/>. Acesso em: 10 jun. 2019.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.

PAULI, Evandro Armini de. **Noções básicas de processos de soldagem e corte - mecânica**. 1996. Disponível em: <http://www.abraman.org.br/arquivos/73/73.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019.

PANDOLFO, Diogo. **Estudo da tenacidade ao impacto de um aço sae 1020 submetido a tratamentos térmicos**.

Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul Faculdade de Engenharia, Porto Alegre, 2009. Disponível em: <file:///C:/Users/Acad%C3%AAmico/Downloads/6045-Texto%20do%20artigo-20096-1-10-20091026.pdf> . Acesso em: 05 jun. 2019.

PAVANATI, Henrique Cezar. **Noções básicas de preparação metalográfica**. Florianópolis: Instituto Federal Santa Catarina, 2019. 46 slides, color. Disponível em: <http://pavanati.com.br/doc/Teoria%20Basica%20de%20Metalografia.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2019.

PHILLIPS, A. L. **Welding handbook: special welding processes and cutting**. London: American Welding Society, 1965b.

ROCHA, Rodrigo Mattos Amaral. **Estudo da zona termicamente afetada de soldagem de revestimento de aço 9%Ni com superliga de Ni625 empregando o processo GTAW/**. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2018. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10025974.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SCHEID, Adriano. **Curso básico de aços. 2010**. Disponível em: <http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM343/A%C7OS.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2019.

VOESTALPINE Böhler Welding Soldas do Brasil LTDA. (org.). **Consumíveis para manutenção e reparo**. 2018. Disponível em: <http://www.kezverchile.cl/wpcontent/uploads/2018/09/Catalogo-Soldaduras-UTP-kezver-chile.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2019.

VOESTALPINE Böhler Welding. **Filler metals for repair, anti-wear and anti-corrosion**. Disponível em: <https://www.alumaq.com.br/wp-content/uploads/2016/08/utp-682-lc.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2019.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE USINAGEM NA RUGOSIDADE DO AÇO SAE 1020 EM TORNEAMENTO

Jozuan Alexandre¹

Cristiano Silvano²

Derek Manoel Luup Carvalho³

Rodolfo Lucas Bortoluzzi⁴

Resumo: A condição da superfície usinada é o resultado de uma série de fatores como deformações plásticas e elásticas, vibração, geração de calor, ferramentas utilizadas, parâmetros de corte. O conjunto desses fatores podem gerar efeitos diferentes na superfície da peça, dessa forma a qualidade superficial da peça engloba grande número de fatores. Esses fatores devem ser analisados para que se obtenha a maior qualidade superficial desejada. O presente trabalho analisa a rugosidade na superfície usinada em torneamento cilíndrico externo do aço SAE 1020, verificando os principais efeitos dos parâmetros de usinagem: raio de ponta da ferramenta (r_ϵ), velocidade de corte (v_c), avanço (f), profundidade de corte (a_p), no parâmetro de rugosidade R_a . Por meio de análise estatísticas verificou-se que os parâmetros que geraram maior significância foram: o avanço, a velocidade de corte e o raio de ponta da ferramenta.

Palavras-chave: Torneamento. Rugosidade. Acabamento.

1 INTRODUÇÃO

A usinagem pode ser entendida como o processo de fabricação em que uma ferramenta de corte é empregada para remover material afim de produzir o formado da peça desejada.

¹ E-mail: jozuam07@gmail.com.

² E-mail: criscs22@hotmail.com.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

⁴ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

A ação principal de corte na usinagem abrange a deformação por cisalhamento do material para formar o cavaco, conforme o cavaco vai sendo removido uma nova superfície vai sendo exposta (GROOVER, 2016).

Pode-se entender a usinabilidade como o grau de dificuldade de usinar um determinado tipo de material. Entende-se como características de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis pertencentes ao processo, como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, forças de corte, temperatura de corte, produtividade, e características da formação do cavaco (DINIZ, 2014).

A usinagem é um dos processos mais importantes da fabricação. A revolução industrial e assim sendo, o aumento da economia de manufatura no mundo pode ser relativo ao desenvolvimento das várias operações na usinagem (GROOVER, 2016).

A rugosidade ou textura primária é formada por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que trabalhou sobre a superfície da peça e encontra-se sobreposta ao perfil de ondulação. A ondulação é o conjunto das irregularidades repetidas em forma de ondas de comprimento bem maior que sua amplitude, causadas por impressões de movimentos dos equipamentos (NOVASKI, 2013).

Na empresa USINDI a medição da rugosidade é feita pelo tato do líder do setor, não existe um padrão controlado dos parâmetros a serem utilizados como: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, tipos de ferramenta, fluido de corte, para poder obter melhor produtividade do equipamento, rugosidade dentro do limite tolerável e menos erros de fabricação.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência no material SAE 1020, três avanços, três velocidades de corte, três profundidades de cortes e duas ferramentas sobre o acabamento superficial das peças por meio de um torneamento cilíndrico externo. Para tanto, 54 corpos de prova torneados com três diferentes avanços (f), 0,15; 0,20 e 0,30 mm/rot, três diferentes de profundidade de corte (A_p), 1,0; 2,0

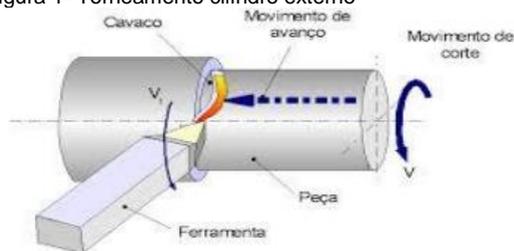
e 3,0 mm, três velocidades de corte (V_c), 240; 280 e 360 m/min e duas ferramentas com diferentes raios de ponta, 0,4 mm e 0,8 mm. Todas as variáveis em estudo foram combinadas entre si durante os testes de usinagem e o método adotado para verificar o acabamento superficial foi a medição da rugosidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

É o procedimento de corte que acontece entre o material e uma ferramenta de corte que terá uma peça no formato esperado. Na usinagem básica ocorre a retirada de material através da ferramenta de corte formando cavaco, e cada retirada expõe uma superfície (Figura 1). Para que o corte do material aconteça é necessário que ocorra a interação entre ferramenta e o material, então temos dois movimentos, deslocamento em direção a peça que é o avanço e outro movimento circular que é a velocidade de corte (GROOVER, 2014).

Figura 1- Torneamento cilindro externo



Fonte: Diniz, A. E. *et al.*, 2008.

Segundo DINIZ, (2008) a velocidade de corte é a velocidade resultante do movimento circular da peça em torno da ferramenta, para as operações de corte em torneamento onde os movimentos de corte e de avanço acontecem conjuntamente (Equação 1). A velocidade de corte é calculada por:

$$VC = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 1}$$

vc = velocidade de corte (m/min)
 d = diâmetro (mm)
 n = rotação (rpm)

A velocidade de avanço em operações do tipo torneamento, é o resultado do avanço, pela rotação, que é o caminho de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta (Equação 2). Esta é dada por (DINIZ, 2008):

$$Vf = f \cdot n = \frac{1000 \cdot vc}{n \cdot d} \cdot f \quad \text{Equação 1}$$

f = avanço (mm/volta)
 Vf = velocidade de avanço (m/min)

Nessas situações o fator determinante é o ferramental que tem papel fundamental nas definições sobre o fluido refrigerante, profundidade de corte, avanço, sempre tendo como base o dimensionamento da peça a ser trabalhada (GROOVER, 2014).

2.2 USINABILIDADE

A usinabilidade pode ser entendida como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Entende-se como propriedades de usinagem de um material aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis pertencentes ao processo, tais como vida da ferramenta, acabamento superficial da peça, esforços de corte, temperatura de corte.

Pode-se ter um material que tenha uma boa usinabilidade quando se leva em conta uma propriedade de usinagem, por exemplo, a vida da ferramenta e não possua boa

usinabilidade quando torna outra propriedade, como a rugosidade da peça usinada (DINIZ, 2008).

2.3 RUGOSIDADE

A rugosidade de uma peça é formada por marcas deixadas pela ferramenta que atuou na superfície da peça. As marcas aparecem na peça quando a máquina está usinando algum material com uma ferramenta de corte. Ainda pode-se confirmar que a ondulação ou textura secundária é uma coleção de irregularidades repetitivas de ondas de comprimento bem superior que sua amplitude, surgida por inexactidões de movimentos nos equipamentos. Essas ondulações podem ser causadas por vibrações oriundas da máquina ferramenta no processo da usinagem. Os sulcos produzidos pela ferramenta podem ser verificados por diferentes parâmetros de rugosidade (NOVALSKI, 1994).

De acordo com Bralha (1988), a capacidade das operações no processo de usinagem para que se construa um acabamento preciso dependem diretamente da ferramenta de corte, das propriedades da peça, dos processos de usinagem, dos parâmetros de corte e do fluido de corte. Segundo Kalpakjian e Schmid (2010), a textura alcançada está relacionada com as anormalidades presentes na superfície de materiais sólidos e com as propriedades dos instrumentos de medição. A superfície é determinada em termos de: rugosidade, ondulação, marcas e falhas.

Segundo Mesquita (1992) a definição do acabamento como um termo amplamente utilizado para que seja caracterizada a condição geral de uma superfície que foi usinada. O propósito da usinagem é obter uma superfície que apresente condições superficiais (textura) e subsuperficiais (integridade) conveniente, a fim de garantir segurança, confiança e vida longa ao objeto fabricado. A rugosidade é causada pelo processo de usinagem e não somente pela máquina. Conforme Machado (2009), os fatores que pioram a rugosidade são: a) Marcas da ferramenta ou partículas da

mesma, podendo ocorrer natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros; b) Geração de arestas do material durante o processo de usinagem; c) Excesso de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície; d) Formato do quebraçavaco na ponta da ferramenta.

Conforme Geier, Mello e Souza (2011), a ondulação pode ser designada a características da máquina, tais como desbalanceamento do eixo, alteração do mecanismo de avanço, baixa rigidez etc. Os erros de forma em geral são causados por: a) Forma da quebra cavaco na ponta da ferramenta; b) Rigidez insatisfatória no sistema de posicionamento e fixação (alteração do material de trabalho em função das forças de corte); c) Alteração no barramento utilizado para guiar a peça; d) Resíduos em excesso no material, decorrentes de outros processos de fabricação antecedentes, tais como tratamentos térmicos, conformação mecânica, fundição, soldagem e outros.

Segundo Diniz (2008), sempre que o raio de ponta da ferramenta é aumentado a ponta da ferramenta fica mais resistente. No entanto, conseqüentemente, há um aumento da vibração da ferramenta por causa do aumento do atrito, que é originada pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça, prejudicando de forma negativa a rugosidade.

A rugosidade de uma peça produzida sofre influência de variados fatores, a partir do processo de fabricação até a própria geometria da ferramenta de corte a ser utilizada, abrangendo os parâmetros de corte. Diniz (2008), expõe dentre os parâmetros de corte, o avanço (f) e o raio de ponta da ferramenta (r_e), como os principais responsáveis pelo acabamento, deixando, desta forma, uma contribuição geométrica à rugosidade da superfície da peça.

2.4 AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE

Para que se possa fazer a escolha do instrumento de medição para texturas superficiais, pode basear-se em informações técnicas existentes em normas técnicas. A ASME

B46.1:2002 decompõe na maior parte em três grupos de instrumentos de medição de textura superficial, que são: instrumentos de perfil completo, instrumentos com propriedades limitada de parâmetros e de perfil e instrumentos com parâmetros somente.

Dentre os instrumentos que criam perfis completos podem ser distinguidos entre si pelo tipo de sensor de medição, que podem ser apalpadores, feixe de luz ou de elétrons.

A maioria dos instrumentos de medição de textura superficial baseiam-se no princípio da identificação das imperfeições pelo deslocamento do apalpador sobre a superfície a uma certa velocidade e distância de análise. Um sinal elétrico é obtido e amplificado para produzir uma identificação da textura superficial (DAGNALL, 1998).

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

3.1 MATERIAIS DO CORPO DE PROVA

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi utilizado uma barra de aço SAE 1020 com diâmetro de 38 mm e 1650mm de comprimento. Esse material foi fornecido pela USINDI e o certificado de qualidade pela Conte distribuidora de aços Ltda. A composição química, de acordo com o fabricante, mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do aço SAE 1020. Certificado de qualidade (% em massa) do material utilizado

C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cr %	Ni %	Cu %	Al %	Mo %	Nb %
0,21	0,57	0,17	0,019	0,029	0,13	0,09	0,26	0,008	0,022	0,001

Fonte: Conte distribuidora de aços.

3.2 MÁQUINA FERRAMENTA UTILIZADA

A máquina ferramenta utilizada foi um torno CNC FILLER modelo FTC20- Fig. 2 A usinagem foi realizada no setor de usinagem da Empresa USINDI localizada em Tubarão SC.

Figura 2 - Torno CNC FEELER FTC20



Fonte: Dos Autores.

3.3 CORPOS DE PROVA

Do comprimento total de 1650mm foram seccionados em três partes de 550 mm para melhor acondicionamento no torno cnc, gerando dessa forma 54 corpos de prova (Figura 3) com diâmetro de 32 mm por 22 mm de comprimento.

Figura 3 - Corpos de prova usinados



Fonte: Dos Autores.

Os corpos de prova foram torneados, utilizando-se dois tipos de insertos de Carboneto de Tungstênio sendo um código do fabricante WNGG080408-PM (Figura 4) (a) com raio de

ponta de 0,8 mm e outro WNNG080404-PM (figura 4) (b) com raio de ponta de 0,4 mm de diâmetro.

Figura 4 - Insertos utilizados para usinar os corpos de prova



Fonte: Dos Autores.

3.4 CONDIÇÕES DE CORTE UTILIZADA

Para os ensaios foram definidas como variáveis: a velocidade de corte (V_c), o avanço (f), a profundidade de corte (A_p), o raio de ponta da ferramenta (r_ϵ). Conforme mostra a Tabela 2 e 2.1.

Tabela 2- Variáveis utilizadas na usinagem dos corpos de prova

Raio de ponta 0,8mm			
V_c (m/min)	240	280	360
A_p (mm)	1,0	2,0	3,0
f (mm/r)	0,15	0,2	0,3

Fonte: Dos Autores.

Tabela 3 - Variáveis utilizadas na usinagem dos corpos de prova

Raio de ponta 0,4mm			
V_c (m/min)	240	280	360
A_p (mm)	1,0	2,0	3,0
f (mm/r)	0,15	0,2	0,3

Fonte: Dos Autores.

3.5 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

Para a realização da análise da superfície usinada de cada corpo de prova, foi utilizado um rugosímetro portátil

modelo Mitutoyo SJ 201P, que possibilita a obtenção de vários parâmetros, dos quais o parâmetro Ra foi utilizado. Ra termo em inglês (roughness average), significa rugosidade média e é o mais utilizado. conforme figura 5.

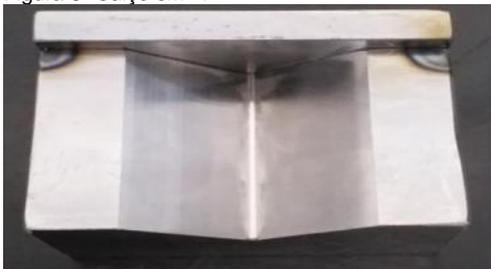
Figura 5- Rugosímetro utilizado para medição dos testes



Fonte: Dos Autores.

Na realização dos testes de usinagem a peça foi colocada sobre um calço com um rebaixo em “V” (figura 6), que dessa forma apoiou as peças em formatos cilíndricos.

Figura 6- Calço em “V”



Fonte: Dos Autores.

3.6 MÉTODOS

Os testes de usinagem foram realizados com aço SAE 1020, com três diferentes avanços 0,15; 0,20 e 0,30 mm/rot, duas ferramentas de usinagem com dois diferentes raios de ponta 0,4 mm e 0,8 mm. As velocidades de corte escolhidas foram 240, 280 e 360 m/min, obedecendo as especificações do

fabricante. Para cada combinação de parâmetros foi usinado um corpo de prova gerando um total de 54 corpos de prova. Com base no diâmetro usinado e na velocidade de corte a velocidade variou de 2315 RPM a 3274 Rpm. A profundidade de usinagem foi variada com três valores 1,0; 2,0 e 3,0 mm, dentro da faixa de profundidade recomendada pelo fabricante da ferramenta. O comprimento de usinagem foi de 22 mm para todos os ensaios.

Durante os testes, foi colocado uma balde de pvc para que os corpos de provas caíssem dentro sem danificar as superfícies. Dessa forma a cada término de um teste de usinagem o corpo de prova era removido, enumerado para facilitar a sua identificação ao longo de todos os testes e protegido com vaselina para evitar a corrosão e possíveis distorções ao longo dos testes de rugosidade.

Na realização dos testes de rugosidade as peças foram colocadas sobre um calço com um rebaixo em “V” que melhor apoiou as peças em formatos cilíndricos, então o rugosímetro foi apoiado de modo que a agulha de medição entrasse em contato com a peça, e assim acionado, realizando a medição da rugosidade (figura 7). Para cada corpo de prova foram efetuadas cinco leituras de rugosidade, efetuando a média aritmética afim de obter um resultado com mais confiabilidade.

Figura 7 - Medição da rugosidade



Fonte: Dos Autores.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Para as cinco medições de cada amostra, foi calculado o desvio padrão (σ) e o intervalo de confiança (IC), com uma confiabilidade de 95 %. Tabela 3 e 4.

Tabela 4 - Medições de rugosidade das amostras com inserto raio de ponta 0,8 mm

corpo prova	Vc mm	Ap mm	f mm/r	Raio de ponta 0,8 mm							
				med 1	med 2	med 3	med 4	med 5	média	σ	IC
1	240	1,0	0,15	1,81	1,81	2,05	2,04	1,83	1,91	0,125	0,156
2	240	1,0	0,2	2,76	2,71	2,58	2,84	2,83	2,74	0,106	0,132
3	240	1,0	0,3	4,67	4,44	4,37	4,00	3,65	4,23	0,402	0,499
4	240	2,0	0,15	1,90	2,00	1,84	1,57	1,89	1,84	0,162	0,201
5	240	2,0	0,2	2,89	2,82	2,95	2,92	2,78	2,87	0,070	0,088
6	240	2,0	0,3	4,01	3,84	3,63	3,70	4,29	3,89	0,265	0,329
7	240	3,0	0,15	1,90	1,81	1,65	1,92	1,69	1,87	0,044	0,055
8	240	3,0	0,2	2,93	3,03	2,58	2,50	3,04	2,82	0,257	0,319
9	240	3,0	0,3	5,43	5,39	5,50	5,46	5,30	5,42	0,076	0,095
10	280	1,0	0,15	1,91	2,00	2,01	2,07	2,01	2,00	0,057	0,071
11	280	1,0	0,2	3,02	2,96	2,94	3,08	3,14	3,03	0,083	0,103
12	280	1,0	0,3	5,16	5,23	5,06	4,98	4,98	5,08	0,111	0,138
13	280	2,0	0,15	1,92	2,09	2,04	2,14	2,13	2,06	0,090	0,111
14	280	2,0	0,2	2,90	2,95	3,05	2,90	3,25	3,01	0,147	0,183
15	280	2,0	0,3	4,91	4,73	4,80	4,98	4,48	4,78	0,194	0,240
16	280	3,0	0,15	1,99	1,95	2,01	1,87	1,78	1,92	0,095	0,118
17	280	3,0	0,2	3,17	3,23	3,16	3,19	3,15	3,18	0,032	0,039
18	280	3,0	0,3	5,16	4,96	5,24	5,04	4,94	5,07	0,129	0,161
19	360	1,0	0,15	1,95	2,03	1,92	1,87	1,81	1,92	0,083	0,103
20	360	1,0	0,2	3,05	3,15	3,21	3,19	3,19	3,16	0,064	0,080
21	360	1,0	0,3	4,95	4,89	4,89	4,65	4,48	4,81	0,189	0,235
22	360	2,0	0,15	1,97	1,91	2,00	1,97	1,97	1,96	0,033	0,041
23	360	2,0	0,2	3,07	3,16	2,94	3,20	2,92	3,06	0,126	0,157
24	360	2,0	0,3	4,80	5,06	4,96	4,65	4,45	4,82	0,232	0,288
25	360	3,0	0,15	1,91	1,95	2,04	2,05	1,98	1,99	0,059	0,074
26	360	3,0	0,2	3,26	3,28	3,27	3,24	3,22	3,25	0,024	0,030
27	360	3,0	0,3	4,32	4,41	4,82	4,49	4,61	4,57	0,232	0,288

Fonte: Dos Autores.

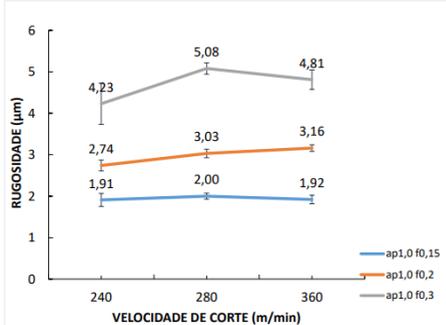
Tabela 5 - Medições de rugosidade das amostras com inserto raio de ponta 0,4 mm

corpo prova	Vc mm	Ap mm	f mm/r	Raio de ponta 0,4 mm							
				med 1	med 2	med 3	med 4	média	σ	IC	
1	240	1,0	0,15	1,67	1,72	1,83	1,65	1,74	1,72	0,070	0,086
2	240	1,0	0,2	3,41	3,31	3,24	3,27	3,19	3,28	0,083	0,103
3	240	1,0	0,3	6,56	6,18	5,83	5,37	6,19	6,03	0,448	0,557
4	240	2,0	0,15	1,85	1,82	1,81	1,83	1,61	1,82	0,017	0,021
5	240	2,0	0,2	3,10	3,18	3,07	3,08	3,07	3,10	0,040	0,058
6	240	2,0	0,3	5,79	6,17	6,29	6,03	6,06	6,35	0,415	0,515
7	240	3,0	0,15	1,90	2,00	1,86	1,93	1,91	1,92	0,051	0,064
8	240	3,0	0,2	3,48	3,33	3,23	3,35	3,40	3,36	0,082	0,114
9	240	3,0	0,3	6,13	5,92	5,99	6,31	5,87	6,04	0,178	0,221
10	280	1,0	0,15	1,74	1,86	1,71	1,63	1,68	1,72	0,082	0,111
11	280	1,0	0,2	3,29	3,24	3,11	3,23	3,16	3,21	0,071	0,086
12	280	1,0	0,3	6,27	6,37	6,43	6,27	6,41	6,35	0,076	0,095
13	280	2,0	0,15	1,92	1,99	1,99	1,92	1,85	1,93	0,059	0,073
14	280	2,0	0,2	3,47	3,39	3,54	3,37	3,38	3,43	0,073	0,091
15	280	2,0	0,3	6,13	5,85	6,28	6,69	6,74	6,34	0,378	0,469
16	280	3,0	0,15	1,95	1,92	2,03	1,95	2,05	1,98	0,057	0,070
17	280	3,0	0,2	3,48	3,37	3,50	3,50	3,58	3,48	0,069	0,086
18	280	3,0	0,3	6,61	6,67	6,73	6,50	6,62	6,63	0,085	0,106
19	360	1,0	0,15	1,79	1,75	1,80	1,86	1,92	1,82	0,067	0,083
20	360	1,0	0,2	3,50	3,29	3,27	3,32	3,34	3,34	0,091	0,113
21	360	1,0	0,3	6,05	5,58	6,21	6,55	6,31	6,14	0,370	0,459
22	360	2,0	0,15	2,09	1,86	1,84	1,89	1,95	1,93	0,101	0,125
23	360	2,0	0,2	3,32	3,33	3,32	3,37	3,47	3,36	0,064	0,079
24	360	2,0	0,3	5,54	5,49	5,51	5,76	6,27	5,72	0,330	0,410
25	360	3,0	0,15	1,95	1,94	2,04	2,01	2,06	2,00	0,053	0,066
26	360	3,0	0,2	3,37	3,34	3,33	3,37	3,41	3,36	0,031	0,039
27	360	3,0	0,3	6,04	6,45	6,59	6,74	6,14	6,39	0,296	0,366

Fonte: Dos Autores.

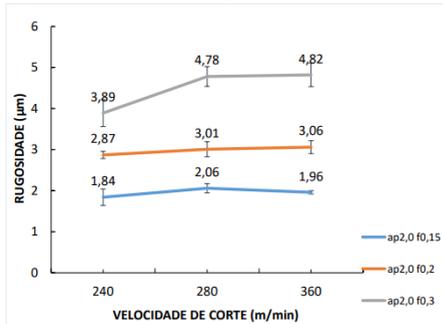
Gráficos com inserto raio de ponta 0,8MM

Figura 8 - Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



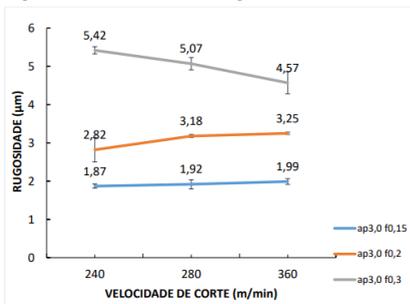
Fonte: Dos Autores.

Figura 9 - Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



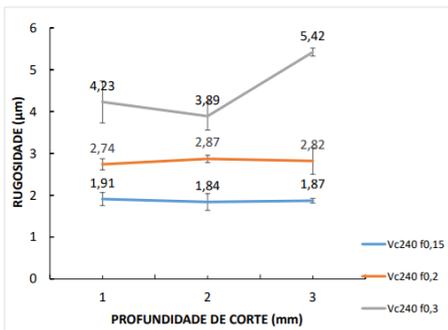
Fonte: Dos Autores.

Figura 10 - Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



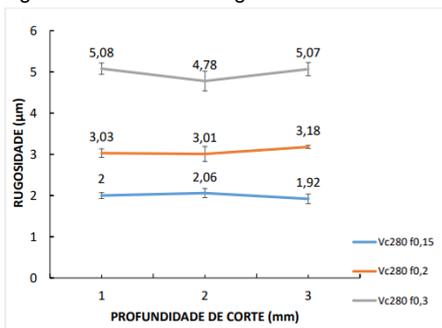
Fonte: Dos Autores.

Figura 11 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



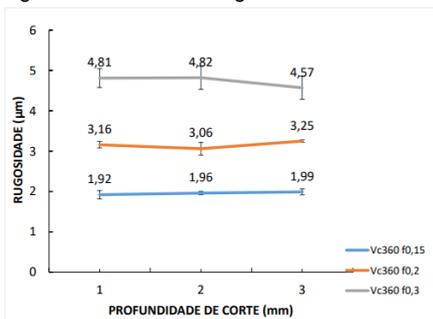
Fonte: Dos Autores.

Figura 12 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



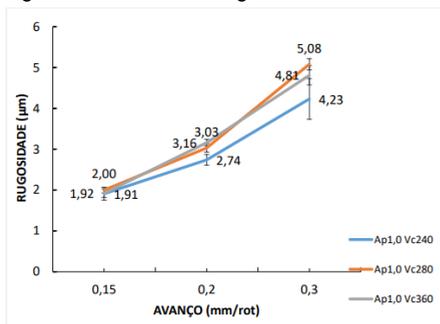
Fonte: Dos Autores.

Figura 13 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



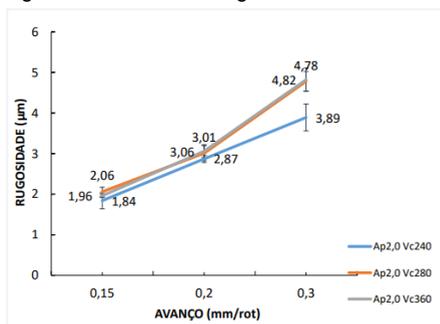
Fonte: Dos Autores.

Figura 14 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



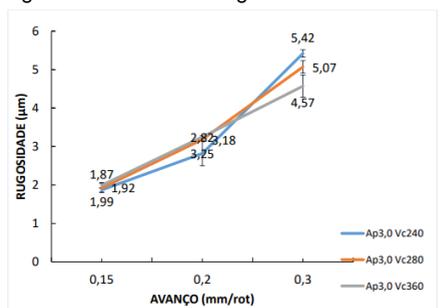
Fonte: Dos Autores.

Figura 15 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



Fonte: Dos Autores.

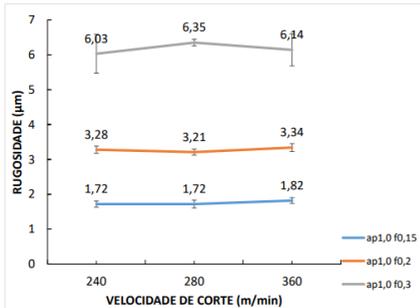
Figura 16 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



Fonte: Dos Autores.

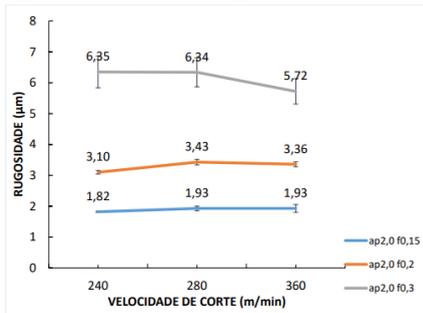
Gráficos com inserto raio de ponta 0,4MM

Figura 17- Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



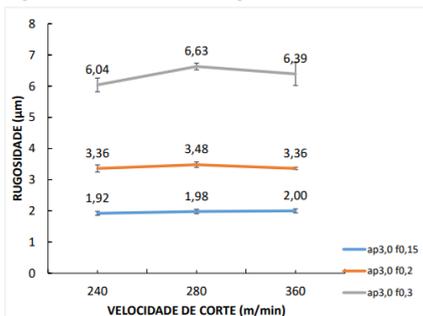
Fonte: Dos Autores.

Figura 18 - Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



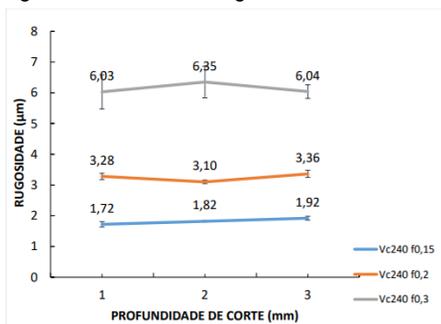
Fonte: Dos Autores.

Figura 19 - Gráfico da rugosidade média em função da velocidade de corte



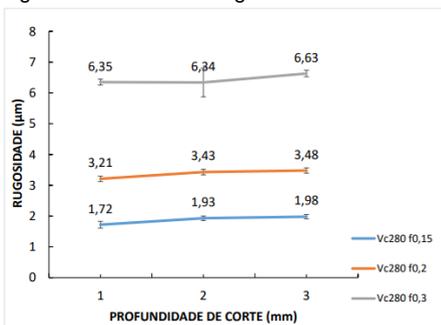
Fonte: Dos Autores.

Figura 20 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



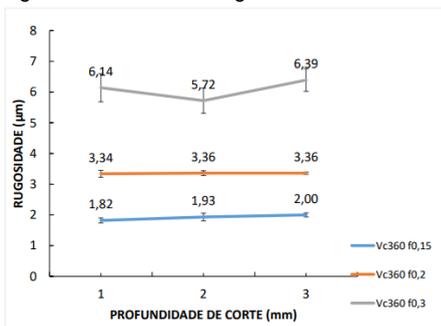
Fonte: Dos Autores.

Figura 21 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



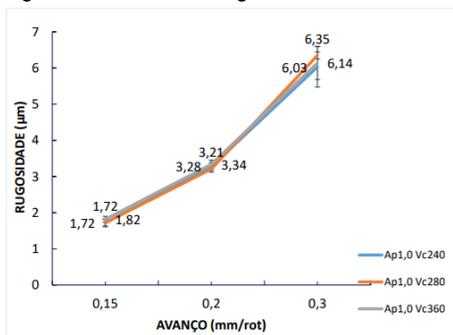
Fonte: Dos Autores.

Figura 22 - Gráfico da rugosidade média em função da profundidade de corte



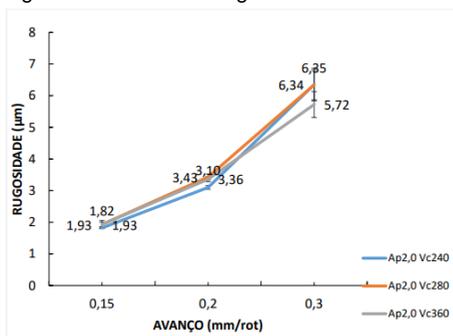
Fonte: Dos Autores

Figura 23 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



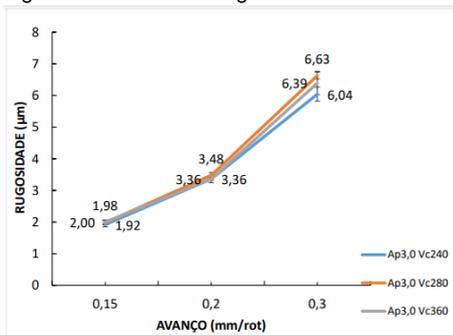
Fonte: Dos Autores

Figura 24 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



Fonte: Dos Autores

Figura 25 - Gráfico da rugosidade média em função do avanço



Fonte: Dos Autores

5 CONCLUSÕES

De acordo com os dados obtidos através das análises estatísticas, no decorrer dos estudos, foi possível concluir que os avanços tiveram maiores alterações nos parâmetros de rugosidade.

- Os parâmetros de avanços (f) tiveram grande influência na rugosidade, quanto maior o avanço (f) pior a rugosidade;

- O inserto de raio de ponta de 0,4 mm apresentou piores resultados de rugosidade com o aumento do avanço (f);

- A menor rugosidade obtida foi de 1,72 μm , com o avanço (f) de 0,15 mm/rot., velocidade de corte (Vc) 240 m/min, profundidade de corte (Ap) 1,0 mm e raio de ponta do inserto de 0,4 mm;

- A maior rugosidade obtida foi de 6,63 μm , com o avanço (f) de 0,30 mm/rot., velocidade de corte (Vc) 280 m/min e profundidade de corte (Ap) 3,0 mm e raio de ponta do inserto de 0,4 mm;

- A profundidade de corte (Ap) não provocou variações significativas na rugosidade;

- A velocidade de corte (vc) apresentou pequenas variações na rugosidade nas condições avaliadas;

- O inserto de raio de ponta de 0,8mm teve menor rugosidade com avanço (f) de 0,20 e 0,30 mm/rot. em 100% dos casos;

- O inserto de raio de ponta de 0,4 mm teve menor rugosidade com avanço (f) de 0,15 mm/rot. em 66% dos casos.

REFERÊNCIAS

BRALLA, J. G. **Handbook of product design for manufacturing**: a practical guide to lowcost production. 2. ed.

New York: McGraw- Hill, 1988.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

DAGNALL, H. **Exploring surface texture**. 3. ed. England: Taylor Hobson Limited, 1998.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Artliber, 2008.

GEIER, M.; MELLO, M. S.; SOUZA, A. J. **Comparação entre ferramenta alisadora e ferramenta convencional no torneamento de acabamento para aços baixo carbono e baixa liga**. Artigo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: 2011.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice-Hall, 2010.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009.

MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função e fabricação**. Florianópolis: Tese (Doutorado) – POSMEC, UFSC, 1992.

NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994.

ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DA NORMA NBR ABNT 15575

Luiza Carolina Barbieri Pereira¹
Rodolfo Lucas Bortoluzzi²
Derek Manoel Luup Carvalho³

Resumo: O estudo faz uma revisão das normas aplicáveis a prevenção de incêndio e a aplicação de fita intumescente em tubos de passagem de água e esgoto entre pavimentos. Foi realizado um teste conforme a norma técnica NBR 10636 e os resultados dos testes foram apresentados e discutidos. Verificou-se que a fita intumescente é eficiente no isolamento entre os pavimentos em temperaturas a partir de 195°C e que apenas após essa temperatura provoca o fechamento da abertura.

Palavras-chave: Normas técnicas. Incêndio. Fita intumescente.

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo tem como temática o acompanhamento das normativas ABNT NBR 15575 (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020) para a prevenção de incêndio em edificações residenciais. Nas edificações a proteção contra incêndios deve ser encarada como uma obrigação de proteger, acima de tudo, as vidas humanas bem como o patrimônio.

Pensando nisso há uma série de medidas a serem tomadas. Novos equipamentos, novas técnicas e legislações, que agora passam a ser constantemente atualizadas, fornecem um conjunto mais robusto de controle de qualidade de obras. Essa necessidade de melhores técnicas, normas e

¹ E-mail: orclanai@hotmail.com.

² E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

³ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

procedimentos na área civil ficaram evidentes a partir do fatídico caso da Boate Kiss no Rio Grande do Sul que resultou em 242 mortes e 680 feridos (NSC TOTAL, 2020). Todo o sistema de segurança na prevenção contra incêndios tornou-se mais rigoroso, este rigor estendeu-se a todos os setores onde a observância das normativas devem ser aplicadas.

No terceiro caderno desta norma (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020), encontra-se o uso de uma fita intumescente para vedação de tubulações hidrossanitárias com diâmetro interno superior a 40 mm, por onde o fogo, fumaça e calor podem se propagar para os andares superiores ou inferiores ao piso atingido. A fita utilizada tem a função de selar o buraco deixado pelo tubo ao ser consumido pelo fogo.

O objetivo deste trabalho é a verificação da aplicação prática da norma NBR ABNT 15575 (ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020) e seus impactos sobre a execução de obras civis. Para cumprir este objetivo foi feito um levantamento bibliográfico mostrando quais necessidades do mercado de construção civil levaram a criação e regulamentação da norma. Além disso será apresentado um levantamento de custos de aplicação, a verificação de como o tempo de construção é afetado pela adoção da normativa, qual o impacto sobre o custo da mão de obra. Outros aspectos importantes que foram avaliados concernentes as características dos novos materiais a serem aplicados e o teste em ambiente controlado para verificar a efetividade do sistema de prevenção a propagação de incêndios.

Como caso concreto de aplicação da fita intumescente foram utilizados os dados e imagens gerados a partir do acompanhamento da obra do edifício Laguna Luxor, no município de Laguna/SC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em todos os processos de engenharia com impacto social importante, existem parâmetros de qualidade e eficiência

padronizados por normas técnicas aplicáveis. Não é diferente no caso das fitas intumescentes como dispositivo de prevenção de incêndios. Para poder entender os requisitos aplicáveis neste estudo foram revisadas diversas normas técnicas, das quais vale salientar e explicitar os requisitos técnicos avaliados para a discussão dos resultados dos testes deste estudo. Assim no item 2.1 faremos a apresentação destas normas.

2.1 NORMAS APLICÁVEIS AO CASO CONCRETO

As normas técnicas e seus principais requisitos estabelecidos visando o controle de riscos relacionados a propagação de focos de incêndio são resumidas a partir deste ponto.

2.1.1. IT 14 COBOM/SC

Ementa: Compartimentação, tempo de resistência ao fogo e isolamento de risco.

Requisitos aplicáveis: Esta Instrução Normativa (IN) estabelece e padroniza os critérios de compartimentação, isolamento de risco de propagação de incêndio e tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) nos processos analisados e fiscalizados pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) como forma de impedir ou reduzir a propagação de incêndios em imóveis.

2.1.2. NBR 5628

Ementa: Componentes construtivos estruturais – determinação da resistência ao fogo.

Requisitos aplicáveis: Esta Norma prescreve o método de ensaio destinado a determinar a resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais representada pelo tempo em que respectivas amostras, submetidas a um programa térmico padrão, satisfazem às exigências desta Norma, conforme os requisitos nela especificados.

2.1.3. NBR 10636

Ementa: Paredes divisórias sem função estrutural – Determinação da resistência ao fogo.

Requisitos aplicáveis: Esta norma prescreve o método de ensaio, classifica e gradua, quanto à resistência ao fogo, as paredes e divisórias sem função estrutural, não tratando, porém, da toxicidade dos gases emanados pelo corpo-de-prova durante a realização dos ensaios.

2.1.4. NBR 14432

Ementa: Tempo de resistência ao fogo dos compartimentos estanques.

Requisitos aplicáveis: A norma estabelece para a edificação de uso residencial multifamiliar com altura superior a 30 m o tempo mínimo de 120 minutos de resistência ao fogo para compartimentos estanques.

2.1.5. Portaria nº 108 Ministério da Justiça e Segurança Pública

Ementa: Institui o Modelo Nacional de Regulamento de Segurança Contra Incêndio e Emergências.

Requisitos aplicáveis: Obrigatoriedade de compartimentação.

2.2 CUSTOS RELACIONADOS A UTILIZAÇÃO

Em todas as obras, uma das maiores preocupações é a manutenção de custos baixos sem prejudicar a qualidade. Como a fita possui aplicação muito simples, bastando para isso envolver a tubulação, não incluímos os valores relacionados a mão de obra e consideraremos apenas os custos de materiais que são devidos somente a aquisição da fita.

Tabela 01 - Custos de aplicação da fita intumescente por tubulação protegida

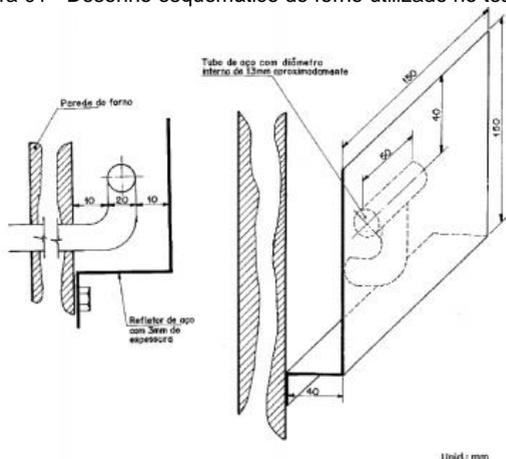
Tubulação	Custo de aplicação (R\$)
Passagem tubulação 50	12,75
Passagem tubulação 75	18,75
Passagem tubulação 100	56,25
Passagem tubulação 150	124,50

Fonte: Do Autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para verificar a efetividade da fita intumescente como material de compartimentação foi realizado um teste utilizando o método descrito na norma NBR 10636. A figura 01, mostra o desenho esquemático da montagem de um forno para o teste de materiais.

Figura 01 - Desenho esquemático do forno utilizado no teste



Fonte: NBR 10636, 1989.

Para os testes feitos neste trabalho foi construído um forno conforme desenho disponível na norma NBR 10636. Neste forno uma tubulação de 50 mm com a fita já posicionada adequadamente conforme recomendações da norma, foi

embutida em uma parede e termopares foram posicionados para registrar os dados de temperatura na parte interna do forno e na parede metálica posicionada após a tubulação de escape de gases. A foto da figura 02 mostra o forno construído para a realização do teste da fita intumescente da marca HILTI (figura 03), que foi doada pelo Grupo Cabreira.

Figura 02 - Fotos do forno de teste já com a fita intumescente instalada na tubulação de 50 mm conforme esquema da norma NBR 10636. Na primeira foto aparece o início do teste com o forno já ligado e tendo sua temperatura avaliada a cada 60 segundos



Fonte: Do Autor.

Figura 03 - Fita intumescente da marca HILTI utilizada no teste



Fonte: Do Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Da revisão bibliográfica foi possível identificar um cenário vasto de normas que apesar de requererem a compartimentação dos ambientes, não trazem muitos detalhes sobre qual o efeito esperado para esta compartimentação levando em consideração a utilização da fita intumescente.

A tabela 2, mostra que, espera-se para um prédio do porte e uso correspondente ao edifício Laguna Luxor, que a os compartimentos sejam estanques ao fogo por no mínimo 120 min (conforme IT 14 COBOM/SC e NBR 14432), para isso pode-se utilizar como teste a capacidade dos gases quentes de inflamar um chumaço de algodão. E que tenham compartimentos em que as faces dos isolamentos não passem de 180°C (NBR 5628).

Tabela 02 - Requisitos aplicáveis ao caso concreto conforme mostrado na introdução

Norma	Requisito	Parâmetro e adequação a norma
IT 14 COBOM/SC	Compartimentação e tempo de resistência ao fogo.	Tempo de resistência ao fogo deve ser maior que 120 min. O prédio em questão possui 63 m de altura, conforme anexo B da norma, deve possuir compartimentalização que permita a resistência ao fogo por tempo superior a 120 min.
NBR 5628	Prescreve o método de ensaio destinado a determinar a resistência ao fogo de componentes construtivos estruturais.	Definição de estanqueidade ao fogo: Considera-se estanque quando os gases quentes não são capazes de inflamar um chumaço de algodão. Isolamento térmico: temperatura na face do isolamento não deve passar de 180°C em qualquer ponto.
NBR 10636	Método de ensaio de resistência ao fogo.	Modelo do forno para teste e perfil de aumento de temperatura.
NBR 14432	Tempo de resistência ao fogo dos compartimentos estanques.	A norma estabelece para a edificação de uso residencial multifamiliar com altura superior a 30 m o tempo mínimo de 120 minutos de resistência ao fogo para compartimentos estanques.
PORTARIA Nº 108 MINISTÉRIO DA JUSTIÇA E SEGURANÇA PÚBLICA	Obrigatoriedade de compartimentação horizontal e vertical.	Não há estabelecimento de temperatura ou tempo de ação da fita intumescente.

Fonte: Do Autor.

Nenhuma das normas fala de toxicidade dos gases, volume de gases que passam através da tubulação, ou do tempo em que a passagem de fumaça a baixa temperatura pode ser tolerada.

Na obra do prédio Laguna Luxor, foi possível verificar a instalação das fitas intumescentes nas tubulações de esgoto sanitário. Fica evidente a simplicidade de aplicação da técnica para compartimentação através do uso da fita intumescente. Na figura 04 - A) Passagem entre os pavimentos 4 e 5, a mocheta ainda não se encontra preenchida então podemos ver claramente as fitas intumescentes já instaladas nas tubulações de esgoto, pluvial e ventilação. B) Passagem entre os pavimentos 6 e 7, o vão entre os canos já estão cimentados, mas ainda conseguimos perceber a instalação da fita. Nessa imagem temos os canos de esgoto e ventilação.

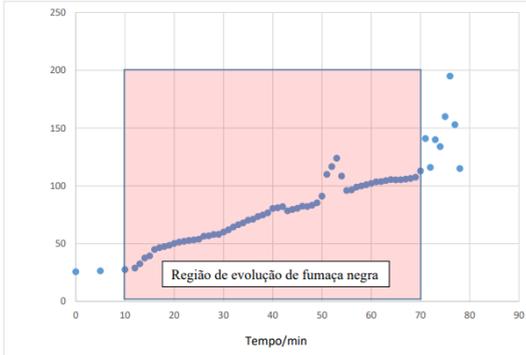
Figura 04 - A) e B) – instalação da fita nas passagens entre pavimentos



Fonte: Do Autor.

O gráfico da figura 05, mostra a evolução da temperatura do face da fita intumescente. Observa-se que ocorre uma reação exotérmica na temperatura logo acima de 115°C e que a partir deste ponto a fita começa a expandir até obstruir completamente a passagem de gases na tubulação, o que corresponde a temperatura final de 195°C. Sendo, portanto, considerado este último, o ponto de funcionamento da fita intumescente.

Figura 05 - Gráfico da evolução da temperatura do forno



Fonte: Do Autor.

A figura 06, mostra a fumaça saindo através da tubulação sendo monitorada. A figura 07 mostra a tubulação obstruída pelo intumescimento da fita no final do experimento, e a figura 08 mostra a parte da tubulação que foi cortada pelo funcionamento da fita.

Figura 06, 07 e 08 - 6) Fumaça saindo da tubulação de testes. 7) Tubulação obstruída pela fita intumescente. 8) Tubo cortado pela ação da fita intumescente



Fonte: Do Autor.

5 CONCLUSÕES

Através da realização deste estudo foi possível verificar que a técnica de compartimentação com uso de fita intumescente é de fácil aplicação, porém, considerando que o número de tubulações existentes em uma construção de grande porte é significativo e que o custo unitário de implantação não é inexpressível (conforme dados mostrados na tabela 1) podemos concluir que o custo da obra será impactado pela exigência de uso.

Além disso, os dados do teste da fita conforme a norma NBR 10636 e os requisitos levantados durante a revisão bibliográfica, levam a crer que a estanqueidade dos compartimentos é alcançada, porém permite a evolução de gases tóxicos durante um tempo superior a 60 minutos antes do início do funcionamento da fita intumescente. Neste caso, o fogo não ultrapassa a barreira criada pela fita, porém os riscos gerados pelos fumos continuam a ser de grande monta.

Concluimos que a aplicação da fita intumescente permite o alcance dos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas e legais vigentes, porém ainda não é a solução ideal para a estanqueidade de tubulações.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (ABNT Catálogo. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=195611>. Acesso em: 10 ago. 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5628**: componentes construtivos estruturais: determinação da resistência ao fogo. 2001.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10636**: Paredes divisórias sem função estrutural: determinação da resistência ao fogo - método de ensaio. 1989.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14432**: - exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - procedimento. 2001.

CELULARES das vítimas tocam durante resgate. **NSC Total**. Disponível em: <https://www.nsctotal.com.br/noticias/desepero-celulares-de-vitimastocam-sem-parar-durante-o-resgate>. Acesso em: 8 ago. 2020.

SANTA CATARINA. Corpo de Bombeiros do Estado de Santa Catarina. **Instrução técnica Nº 14** - Compartimentação, tempo de resistência ao fogo e isolamento de risco.

COMPARAÇÃO DE TRÊS MODELOS USUAIS DE TRELIÇA PARA COBERTURA METÁLICA

Leonel Ricardo Luiza¹

Matheus Aguiar de Souza²

Rodolfo Lucas Bortoluzzi³

Derek Manoel Luup Carvalho⁴

Resumo: As estruturas metálicas têm sido utilizadas desde o século XII, na forma de tirantes e pendurais de ferro fundido, servindo de apoio auxiliar para estruturas de madeira. Já no século XVI se tornara comum coberturas de telhado em ferro fundido, porém com modelos pouco racionais, uma vez que em sua época análises estruturais estavam em fase inicial de desenvolvimento. O uso de estruturas metálicas em coberturas se desenvolveu e se tornaram cada vez mais leves e resistentes para suas funções, devido a suas utilizações cada vez mais comum, criação de aços com ligas mais apropriadas e softwares para análise de estruturas. Para esse projeto utilizamos o CYPECAD METÁLICA – 3D, para encontrar o peso máximo, flexa máxima, área de pintura e estados limites últimos, e analisarmos os três modelos estruturais. Parte das serralherias trabalham com perfil U em suas coberturas metálicas, por questão de preço e facilidade em sua produção comparado com cantoneiras que também são uma ótima alternativa para coberturas metálicas. Com base nestes estudos, buscamos uma solução para estes casos trazendo uma análise mais aprofundada em três modelos estruturais de coberturas metálicas muito usuais, utilizando apenas perfil tipo U em seus banzos, diagonais e montantes.

Palavras-chave: Estruturas metálicas. Perfil U. Coberturas. NBR 14762:2010. NBR 8800:2008.

¹ E-mail: leonel.ricardo@outlook.com.br.

² E-mail: contato@protegesc.com.

³ E-mail: rodolfo@fucap.edu.br.

⁴ E-mail: derekmlcarvalho@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil nos dias de hoje é uma área muito competitiva, ou seja, precisam de soluções eficientes, que sejam feitas no prazo com um preço acessível, com uma boa durabilidade.

Estruturas metálicas possuem inúmeras vantagens, principalmente quando há necessidade de velocidade na execução, custos reduzidos com fundações, em comparação com a estruturas de concreto, a metodologia utilizada será em cima das normas NBR 14762:2010 (dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio), NBR 8800:2008 (projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios). Análise feita com base de cálculo por elementos finitos feitas no software CYPECAD METÁLICA – 3D

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Chaves (2001), há alguns anos as estruturas em aço tornaram-se muito utilizadas em projetos por todo o Brasil, competindo diretamente com os projetos em estruturas pré-fabricadas de concreto e vem ganhando espaço uma vez que disponibiliza de muitas vantagens. Segundo Bellei (2003), as principais vantagens da utilização da estrutura em aço são as seguintes, alta resistência do material nos diversos estados de tensão (tração, compressão, flexão e etc), os elementos em aço oferecem uma grande margem de segurança no trabalho, são fabricados em oficina, tem-se a possibilidade de desmontar as estruturas e posteriormente montá-las em outro local e também podem ser reaproveitados os materiais que ficarem em estoque, ou mesmo as sobras de obra.

Devido a grande resistência mecânica e a velocidade na execução, a estrutura em aço é amplamente utilizada.

Este trabalho tem como objetivo de trazer informações mais aprofundadas, comparando três modelos de estruturas nas quais será explicado custos, velocidade de execução da

estrutura utilizando as normas ABNT NBR 14762:2010 e NBR 8800:2008.

2.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A NBR 8800:2008 utiliza como base o método dos estados-limites, estabelece os requisitos básicos que devem ser obedecidos no projeto à temperatura ambiente de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edificações. Os perfis de aço sejam laminados ou soldados, ou de seção tubular com ou sem costura e as ligações sejam executadas com parafusos ou soldas.

Segundo a NBR 8800:2008 os perfis de aços devem ser fabricados obedecendo as normas brasileiras aplicáveis, ou as normas ASTM aplicáveis. Segundo a norma, são utilizados estados limites para fins de cálculos e projetos. Estado limite é a condição onde a estrutura torna-se inadequada para desempenhar a função proposta, isto é, os esforços e deformações devem ser inferiores a certos valores limites.

Segundo Bellei (2003), na análise estrutural deve ser considerada a influência de todas as ações que possam produzir efeitos significativos para a estrutura, levando-se em conta os estados-limites últimos e de serviço.

2.2 COBERTURA METÁLICA

Os galpões são construções geralmente de um pavimento, constituídos de colunas regularmente espaçadas com cobertura na parte superior e, às vezes, também nas laterais, se estendendo por grandes áreas e destinados à utilização comercial, industrial, agrícola ou mesmo civil. Os principais elementos são discriminados abaixo para uma melhor compreensão dos sistemas estudados.

2.2.1 Vigas de cobertura treliçadas

Vigas treliçadas são compostas de banzos, montantes

e diagonais, que se associam e formam as vigas treliçadas. Bellei (2004), treliças são um elemento estrutural composto de um arranjo estável de barras que são ligados entre si pelas extremidades, transmitindo esforço de tração e compressão, seu padrão de barras frequentemente subdivide a treliça em áreas triangulares e é selecionado para produzir um membro de apoio leve e eficiente.

2.2.2 Colunas

As colunas têm a função de transmitir ações provenientes da cobertura para as bases ou fundações, submetidas algumas vezes a esforço de compressão e outras vezes a tração, devido a ação do vento.

Colunas são ligadas as fundações pelas bases, sendo rotuladas ou engastadas. Segundo Bellei (2006), bases rotuladas são mais econômicas, porém acarretam em uma estrutura mais pesada, já as engastadas possibilitam uma estrutura mais leve, porém as bases mais caras que a rotulada.

2.2.3 Contraventamentos

Os contraventamentos são barras adicionadas na estrutura com a finalidade de evitar o deslocamento lateral dos elementos estruturais aumentando assim a rigidez estrutural e podem ser horizontais localizados nos planos das terças e no plano do banzo inferior, ou na vertical na qual fazem as ligações entre as colunas. Ambos têm a função de distribuir cargas horizontais proveniente das ações do vento na estrutura.

2.2.4 Terças

São elementos de apoio para telhas de coberturas, além de dar estabilidade a estrutura, ações decorrentes do peso das telhas, sobrecarga e vento são transferidas para as tesouras principais ou secundária por meio das terças as quais sofrem flexão oblíqua.

3 METODOLOGIA

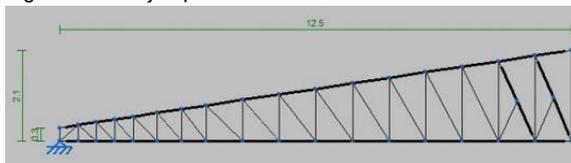
A metodologia adotada neste Trabalho de Conclusão de Curso consiste em definir, o peso da estrutura, deslocamento, superfícies a pintar e comparar ao final deste trabalho o melhor modelo. É utilizado software de cálculo estrutural CypeCAD Metalica – 3D, para cálculo dos estados limites. O software utiliza como a base o cálculo por elementos finitos e os estados limites estabelecidos pelas normas apontadas.

Utilizaremos as cargas:

- Peso próprio (definido pelo software);
- Peso telha;
- Sobrecarga de manutenção.

3.1 ESTRUTURA TIPO 1

Figura 1 - Treliça tipo 1



Fonte: Do Autor.

Comprimento de 25m e ponto 2,10 com inclinação aproximada de 15%.

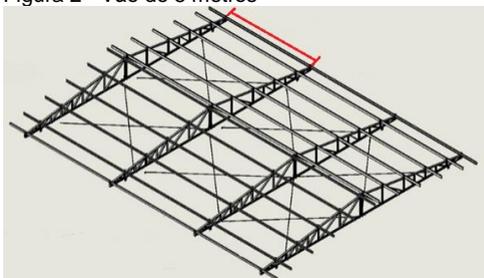
Perfis utilizados:

- Banzos: Perfil dobrado U 127x50x2,65mm (CF-26);
- Diagonais e montantes: Perfil dobrado U 120x40x2,00mm (CF-26).

Este modelo estrutural é um exemplo típico em nossa região para cobertura metálica. Figura 1. Treliça tipo 1.

Será considerado uma carga pontual nos nós onde serão fixadas as telhas, considerando um vão de 5 metros, sua área de influência na tesoura será de 2,5 metros para um lado e 2,5 metros para o outro, supondo o peso da telha Telha trapezoidal galvanizada é de 9kg/m².

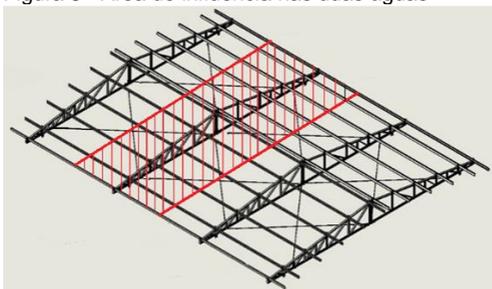
Figura 2 - Vão de 5 metros



Fonte: Do Autor.

Multiplicando a área de influencia pela carga da telha:
 $12,6\text{m} \times 5\text{m} \times 9\text{kg}/\text{m}^2 = 567\text{ Kg}$ em uma água da cobertura.

Figura 3 - Área de influencia nas duas águas



Fonte: Do Autor.

Agora, dividimos o peso da área pela quantidade de nós onde será apoiado as terças.

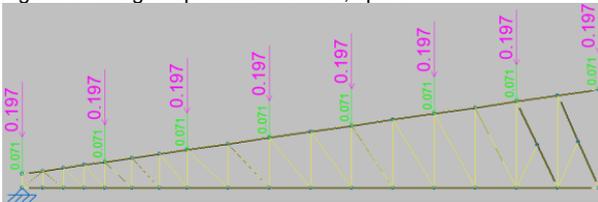
$$567/8\text{nós} = 71\text{ kg/nó}$$

Segundo a seção B.5.1. da NBR8800, “nas coberturas comuns (telhados), na ausência de especificações mais rigorosas, devem ser previstas sobrecargas características mínimas de $0,25\text{kN}/\text{m}^2$ em projeção horizontal”.

$$\text{logo } 12,6\text{m} \times 5\text{m} \times 25\text{kg}/\text{m}^2 = 1575\text{kg}$$

$$\text{Agora } 1575/8\text{nós} = 197\text{kg}/\text{f}$$

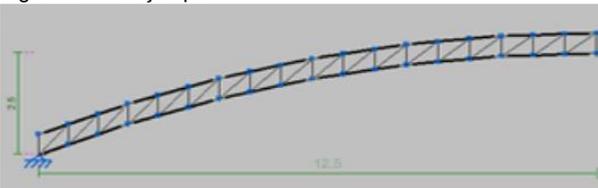
Figura 4 - Cargas aplicadas nos nós, tipo 1



Fonte: Do Autor.

3.2 TRELIÇA TIPO 2

Figura 5 – Treliça tipo 2



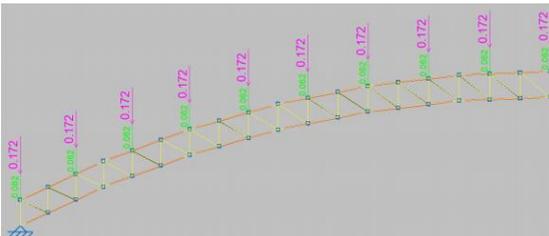
Fonte: Do Autor.

Comprimento de 25m e altura ponto 2,5 m e altura treliça 0,5m.

Perfis utilizados:

- Banzos: Perfil dobrado U 127x50x2,65mm (CF-26);
- Diagonais e montantes: Perfil dobrado U 120x40x2,00mm (CF-26).

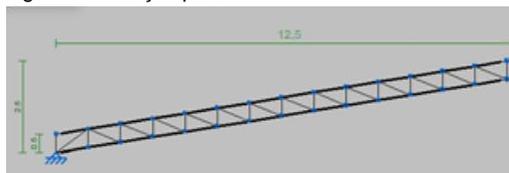
Figura 6 - Cargas aplicadas nos nós, distribuindo peso total das cargas pelos nós, tipo 2



Fonte: Do Autor.

3.3 TRELIÇA TIPO 3

Figura 7 - Treliça tipo 3



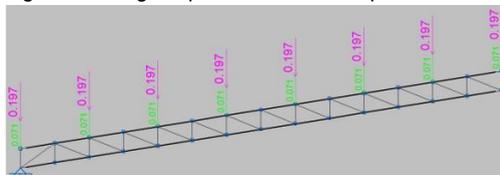
Fonte: Do Autor.

Comprimento de 25m e altura ponto 2,5m e altura treliça 0,5m.

Perfis utilizados:

- Banzos: Perfil dobrado U 127x50x2.65mm (CF-26);
- Diagonais e montantes: Perfil dobrado U 120x40x2.0mm (CF-26).

Figura 8 - Cargas aplicadas nos nós, tipo 3

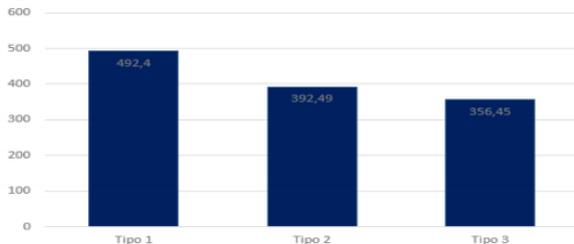


Fonte: Do Autor.

3.4 ANALISE DE PESO DAS ESTRUTURAS

Para as estruturas a cima, encontramos um peso de 492,4kg, 392,49kg e 356,45kg para estrutura tipo 1, tipo 2 e tipo 3 respectivamente.

Figura 9 - Peso encontrado para as estruturas

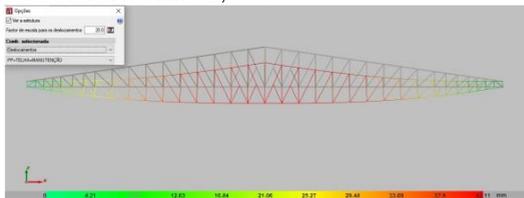


Fonte: Do Autor.

3.5 ESTADOS LIMITES DE SERVIÇO

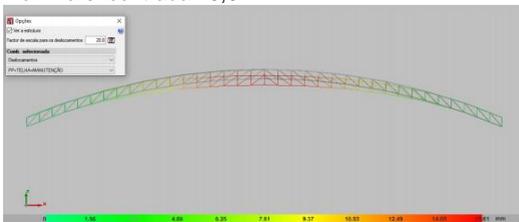
Considerando os E.L.S. (estados limites de serviço) que são aqueles relacionados ao conforto do usuário e à durabilidade, aparência e boa utilização das estruturas, seja em relação aos usuários, seja em relação às máquinas e aos equipamentos suportados pelas estruturas a flecha máxima da cobertura não pode ultrapassar $L/250$, conforme a tabela, norma 8800.

Figura 10 - Flecha Máxima permitida pela norma $25000\text{mm}/250=100\text{mm}$ tipo 1. Flecha máxima encontrada 42,11mm



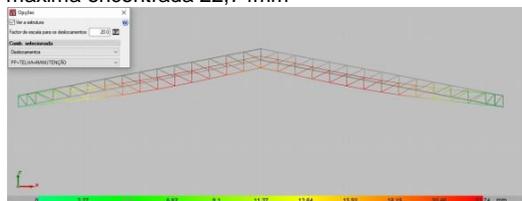
Fonte: Do Autor.

Figura 11 - Flecha Máxima permitida pela norma $25000\text{mm}/250=100\text{mm}$ tipo 2. Flecha máxima encontrada 15,61mm



Fonte: Do Autor.

Figura 12 - Flecha Máxima permitida pela norma $25000\text{mm}/250=100\text{mm}$ tipo 3. Flecha máxima encontrada 22,74mm



Fonte: Do Autor.

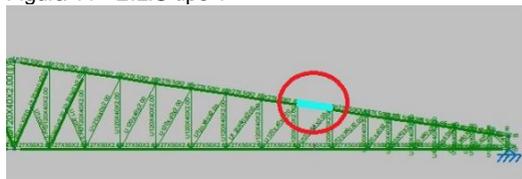
As figuras acima resultam na flecha máxima calculada considerando as cargas iguais do peso da telha e manutenção. Ambas as estruturas tem 25000mm de comprimento logo $25000/250=100$ as três estruturas obtiveram um bom resultado de flecha máxima.

3.6 E.L.U. (ESTADOS LIMITES ULTIMOS)

Abaixo selecionamos o pior ponto de cada estrutura a resistência de compressão, e serão analisados, sucessivamente, os três estados limites últimos exportados do software utilizado para o cálculo de acordo com o Anexo D da NBR 8800:

3.6.1 Estrutura tipo 1

Figura 11 - E.L.U tipo 1



Fonte: Do Autor.

Deve satisfazer:

: 0.963 ✓

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N23, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TELHA+1.5·MANUTENÇÃO.

$N_{c,Ed}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo. $N_{c,Ed}$: 11.944 t

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$N_{c,Rd}$: 12.403 t

Onde:

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra. A_{ef} : 4.68 cm²

c : Fator de redução associado à flambagem, c_{yy} : 0.73

Sendo: c_{zz} : 0.97

I_p : Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas. $I_{p,yy}$: 0.87

$I_{p,zz}$: 0.27

Sendo:

N_e : Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A: Área bruta da seção transversal da barra.

$$A : \frac{5.80}{1} \text{ cm}^2$$

f_t : Tensão de escoamento.

$$f_t : \frac{4352.70}{1} \text{ kgf/cm}^2$$

g: Coeficiente de ponderação das resistências.

$$g : \frac{1.2}{1}$$

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$N_e : \frac{33.604}{1} \text{ t}$$

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$N_{ey} : \frac{33.604}{1} \text{ t}$$

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção.

$$N_{ex} : \frac{343.719}{1} \text{ t}$$

Onde:

$$N_{ex} : \frac{343.719}{1} \text{ t}$$

$$N_{ex} : \frac{\text{¥}}{1}$$

I_x : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X.

$$I_x : \frac{139.00}{1} \text{ cm}^4$$

I_y : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y.

$$I_y : \frac{13.59}{1} \text{ cm}^4$$

I_t : Momento de inércia à torção uniforme.

$$I_t : \frac{0.14}{1} \text{ cm}^4$$

C_w : Constante de empenamento da seção.

$$C_w : \frac{360.98}{1} \text{ cm}^6$$

E: Módulo de elasticidade.

$$E : \frac{2038736}{1} \text{ kgf/cm}^2$$

G: Módulo de elasticidade transversal.

$$G : \frac{784129}{1} \text{ kgf/cm}^2$$

$K_x L_x$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X.

$$K_x L_x : \frac{0.902}{1} \text{ m}$$

$K_y L_y$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y.

$$K_y L_y : \frac{0.902}{1} \text{ m}$$

$K_t L_t$: Comprimento efetivo de flambagem por torção.

$$K_t L_t : \frac{0.000}{1} \text{ m}$$

r_p : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$r_p : \underline{5.86} \text{ cm}$$

Sendo:

r_x, r_y : Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente.

$$r_x : \underline{4.89} \text{ cm}$$

$$r_y : \underline{1.53} \text{ cm}$$

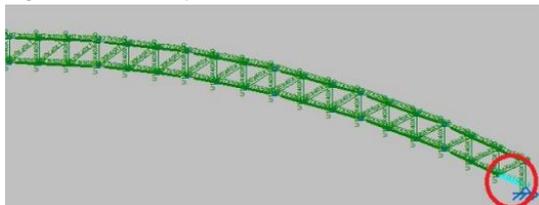
x_0, y_0 : Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção.

$$x_0 : \underline{-28.32} \text{ mm}$$

$$y_0 : \underline{0.00} \text{ mm}$$

3.6.2 Estrutura tipo 2

Figura 12 - E.L.U tipo 2



Fonte: Do Autor.

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.522} \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N26, para a combinação de ações
1.25·PP+1.25·TELHA+1.5·MANUTENÇÃO.

$N_{c,sd}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,sd} : \underline{6.962} \text{ t}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{c,00} : \underline{13.336} \text{ t}$$

Onde:

$$A_{ef} : \text{Área efetiva da seção transversal da barra.} \quad A_{ef} : \underline{4.47} \text{ cm}^2$$

$$c : \text{Fator de redução associado à} \quad c_{yy} : \underline{0.82}$$

$$\text{flambagem,} \quad c_{xx} : \underline{0.98}$$

Sendo:

$$I_r : \text{Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.} \quad I_{0,yy} : \underline{0.68}$$

$$I_{0,xx} : \underline{0.21}$$

Sendo:

N_c : Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

$$A : \text{Área bruta da seção transversal da barra.} \quad A : \underline{5.78} \text{ cm}^2$$

$$f : \text{Tensão de escoamento.} \quad f : \underline{4352.70} \text{ kgf/cm}^2$$

$$g : \text{Coeficiente de ponderação das resistências.} \quad g : \underline{1.2}$$

A força normal de flambagem elástica N_c é o menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$N_c : \underline{53.651} \text{ t}$$

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$N_{cy} : \underline{53.651} \text{ t}$$

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção.

$$N_{cx} : \underline{548.786} \text{ t}$$

Onde:

$$N_{cx} : \underline{548.786} \text{ t}$$

N_{ex} : ¥

- I_x : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X. I_x : 138.53 cm⁴
 I_y : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y. I_y : 13.54 cm⁴
 I_t : Momento de inércia à torção uniforme. I_t : 0.14 cm⁴
 C_w : Constante de empenamento da seção. C_w : 359.85 cm⁶
 E : Módulo de elasticidade. E : 2038736 kgf/cm²
 G : Módulo de elasticidade transversal. G : 784129 kgf/cm²
 $K_x L_x$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em
relação ao eixo X. $K_x L_x$: 0.713 m
 $K_y L_y$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em
relação ao eixo Y. $K_y L_y$: 0.713 m
 $K_t L_t$: Comprimento efetivo de flambagem por torção. $K_t L_t$: 0.000 m
 r_x : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro
de torção.

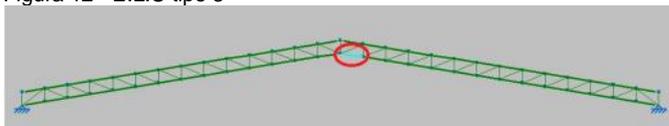
r_x : 5.86 cm

Sendo:

- r_x, r_y : Raios de giração da seção bruta em relação
aos eixos principais de inércia X e Y,
respectivamente. r_x : 4.89 cm
 r_y : 1.53 cm
 x_0, y_0 : Coordenadas do centro de torção na direção
dos eixos principais X e Y, respectivamente, em
relação ao centróide da seção. x_0 : -28.32 mm
 y_0 : 0.00 mm

3.6.3 Estrutura tipo 3

Figura 12 - E.L.U tipo 3



Fonte: Do Autor.

Deve satisfazer:

$$h : \underline{0.668} \quad \checkmark$$

O esforço solicitante de cálculo desfavorável produz-se no nó N46, para a combinação de ações 1.25·PP+1.25·TELHA+1.5·MANUTENÇÃO.

$N_{c,ed}$: Força normal de compressão solicitante de cálculo.

$$N_{c,ed} : \underline{8.222} \text{ t}$$

A força normal de compressão resistente de cálculo $N_{c,Rd}$ deve ser tomada como:

$$N_{c,Rd} : \underline{12.312} \text{ t}$$

Onde:

A_{ef} : Área efetiva da seção transversal da barra.

$$A_{ef} : \underline{4.66} \text{ cm}^2$$

e : Fator de redução associado à flambagem,

$$e_{yy} : \underline{0.73}$$

$$e_{xx} : \underline{0.97}$$

Sendo:

I_r : Índice de esbeltez reduzido para barras comprimidas.

$$I_{r,yy} : \underline{0.87}$$

$$I_{r,xx} : \underline{0.27}$$

Sendo:

N_e : Força normal de flambagem elástica da barra, conforme 9.7.2.

A : Área bruta da seção transversal da barra.

$$A : \underline{5.78} \text{ cm}^2$$

f_y : Tensão de escoamento.

$$f_y : \underline{4352.70} \text{ kgf/cm}^2$$

g : Coeficiente de ponderação das resistências.

$$g : \underline{1.2}$$

A força normal de flambagem elástica N_e é o menor valor entre os obtidos por a) e b):

$$N_e : \underline{33.330} \text{ t}$$

a) Força normal de flambagem elástica por flexão em relação ao eixo Y.

$$N_y : \underline{33.330} \text{ t}$$

b) Força normal de flambagem elástica por flexo-torção.

$$N_{na} : \underline{340.926} \text{ t}$$

Onde:

$$N_a : \underline{340.926} \text{ t}$$

$$N_a : \underline{\text{¥}}$$

I_x : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo X. $I_x : \underline{138.53} \text{ cm}^4$
 I_y : Momento de inércia da seção bruta em relação ao eixo Y. $I_y : \underline{13.54} \text{ cm}^4$
 I_t : Momento de inércia à torção uniforme. $I_t : \underline{0.14} \text{ cm}^4$
 C_w : Constante de empenamento da seção. $C_w : \underline{359.85} \text{ cm}^6$
 E : Módulo de elasticidade. $E : \underline{2038736} \text{ kgf/cm}^2$
 G : Módulo de elasticidade transversal. $G : \underline{784129} \text{ kgf/cm}^2$
 $K_x L_x$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo X. $K_x L_x : \underline{0.904} \text{ m}$
 $K_y L_y$: Comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo Y. $K_y L_y : \underline{0.904} \text{ m}$
 $K_t L_t$: Comprimento efetivo de flambagem por torção. $K_t L_t : \underline{0.000} \text{ m}$
 r_o : Raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

$$r_o : \underline{5.86} \text{ cm}$$

$$r_o : \underline{5.86} \text{ cm}$$

Sendo:

r_x, r_y : Raios de giração da seção bruta em relação aos eixos principais de inércia X e Y, respectivamente. $r_x : \underline{4.89} \text{ cm}$
 x_o, y_o : Coordenadas do centro de torção na direção dos eixos principais X e Y, respectivamente, em relação ao centróide da seção. $x_o : \underline{-28.32} \text{ mm}$
 $y_o : \underline{0.00} \text{ mm}$

3.6.4 Análise de superfície para pintura

A figura abaixo determina a área da superfície a ser pintada, em termos por metro 18 quadrado, onde pegamos a área da superfície através das medidas dos perfis e multiplicamos pelos comprimentos dos mesmos.

Figura 13 - Superfície tipo 1.

Aço dobrado: Quantitativos das superfícies a pintar				
Série	Perfil	Superfície unitária (m ² /m)	Comprimento (m)	Formas (m ²)
U	U120X40X2,00, Duplo I união soldada	0.557	2.100	1.171
	U127X50X2.65	0.442	50.258	22.198
	U120X40X2.00	0.391	82.578	32.266
Total				55.635

Fonte: Do Autor.

Figura 14 - Superfície tipo 2

Aço dobrado: Quantitativos das superfícies a pintar				
Série	Perfil	Superfície unitária (m ² /m)	Comprimento (m)	Formas (m ²)
U	U127x50x2,65	0.442	51.314	22.666
	U120x40x2,00	0.391	52.559	20.537
Total				43.203

Fonte: Do Autor.

Figura 15 - Superfície tipo 3

Aço dobrado: Quantitativos das superfícies a pintar				
Série	Perfil	Superfície unitária (m ² /m)	Comprimento (m)	Formas (m ²)
U	U120x40x2.00	0.391	41.703	16.295
	U127x50x2.65	0.442	50.636	22.367
Total				38.662

Fonte: Do Autor.

4 CONCLUSÕES

Ao analisar-se as estruturas acima notaram-se que a estrutura tipo 2 é mais eficiente para os esforços solicitados pois obteve a menor flecha e o menor “neta” (0.522), comparando com as outras. Ficou em segundo na questão de peso, porém ela pode ser otimizada considerando os dados

apresentados. A estrutura tipo 3 tem o peso menor, porém sua deformação é maior que o tipo 2, e a estrutura tipo 1 foi a que obteve o maior peso e maior deformação.

Segundo as análises de cálculo do modelo elaborado, sob a mesma condição de altura máxima do ponto, perfis utilizados, mesma fixação e cargas aplicadas, a cobertura Tipo 2(arco) obteve a menor flecha considerada devido a sua melhor 19 distribuição de carga e ficou apenas 10,5% de sua superfície a pintar a mais comparada com a tipo 3 e 9,1% mais pesada que a tipo 3.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6123: **Forças devidas ao vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8800:2008: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, 2008.

BELLEI, I. H. **Edifícios industriais em aço**: projeto e cálculo. São Paulo, 2003.

CHAVES, M. R. **Avaliação do desempenho de soluções estruturais para galpões industriais leves**. Ouro Preto, 2007.

BELLEI, Ildony. **Edifícios industriais em aço**. 5. ed. São Paulo: PINI, 2004.

BELLEI, Ildony H. *et al.* **Edifícios de múltiplos andares em aço**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia-Ming; GILBERT, Anne M. **Fundamentos da análise estrutural**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2009.



OS CURSOS DE ENGENHARIA DA FUCAP UNIVINTE TEM COMO MISSÃO CONCEBER ENGENHEIROS COM FORMAÇÃO GENERALISTA, HUMANÍSTICA, CRÍTICA E REFLEXIVA, A PARTIR DO DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS PARA ATENDER AS DEMANDAS LOCAIS E REGIONAIS, TORNANDO-SE PROFISSIONAL COMPETENTE COM HABILIDADES E CREDIBILIDADE PARA ATUAR NAS ÁREAS INERENTES ÀS ENGENHARIAS CIVIL, AMBIENTAL, MECÂNICA E DE PRODUÇÃO. OTIMIZANDO RECURSOS NATURAIS E HUMANOS, APROPRIANDO-SE DE FERRAMENTAS E TÉCNICAS INOVADORAS COM QUALIDADE E DESEMPENHO DO PRODUTO FINAL, CONSIDERANDO SEUS ASPECTOS POLÍTICOS, ECONÔMICOS, SOCIAIS, AMBIENTAIS E CULTURAIS, COM VISÃO ÉTICA E HUMANÍSTICA E ARTICULADO COM AS NOVAS PRÁTICAS EMERGENTES NO CAMPO DO DEVIDO CONHECIMENTO.



EDITORA FUCAP

ISBN 978-65-87169-16-3



97865-7169163