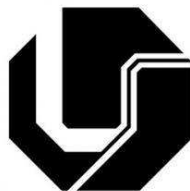


RÔMULO BRIOSCHI CIBIEN

**AVALIAÇÃO DE ENTALHE HELICOIDAL DE
CORPO DE PROVA SNTT**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2021

RÔMULO BRIOSCHI CIBIEN

**AVALIAÇÃO DE ENTALHE HELICOIDAL DE CORPO DE PROVA
SNTT**

Projeto de conclusão de curso **aprovado**
pela banca avaliadora do curso de graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luciano José Arantes - FEMEC - UFU - Orientador

Profa. Dra. Elaine Gomes Assis - FEMEC - UFU

Me. Eng. Guilherme Bernardes Rodrigues - LTAD - FEMEC - UFU

Uberlândia, 29 de Julho de 2021

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer à minha mãe, Rosana Brioschi Cibien, e ao meu pai, João Luiz Cibien, que sempre me deram suporte em todas decisões na minha vida e fizeram a base para que eu possa me desenvolver sempre. Agradeço também ao meu irmão, João Vítor Brioschi Cibien, que também fez Engenharia Mecânica na UFU e compartilhou comigo suas experiências. Meus avós, tios e primos, mesmo de longe, me apoiaram e me amaram e, sempre que necessário, me aconselhavam sobre a vida.

Agradeço ao professor Luciano por ter me confiado esta pesquisa e pelo suporte como orientador durante esses tempos de isolamento social e pandemia. Também agradeço aos profissionais do LTAD, principalmente ao engenheiro Guilherme Bernardes Rodrigues que sanou minhas dúvidas sobre o ensaio SNTT e ao engenheiro Fernando Buiatti Rodrigues que estava sempre disposto a responder minhas dúvidas.

Aos participantes da banca examinadora por terem reservado um tempo para avaliar minha monografia e minha apresentação. Gostaria de agradecer à FEMEC e à UFU pela jornada que tive e pela pessoa que me tornei nesses anos de graduação.

CIBIEN, R. B. **AValiação de Entalhe Helicoidal de Corpo de Prova SNTT**. 2021. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

É de extrema importância para o projetista de estruturas conhecer as propriedades mecânicas do material escolhido e, para isto, testes são feitos para determinar as propriedades específicas de cada material. Atualmente vários novos materiais são desenvolvidos pelo mundo com diversas finalidades, desde cerâmicos semicondutores a polímeros para impressão 3D. Estes novos materiais precisam ter suas propriedades testadas e validadas de forma precisa por testes replicáveis em condições diferentes. O Teste de Torção em Entalhe Helicoidal (SNTT - *Spiral Notch Torsion Test*) foi desenvolvido para resolver as limitações dos testes padronizados pela norma ASTM E399, que muitas vezes são limitados pelo efeito de forma. Além de superar as limitações técnicas destes ensaios, esse novo método também inova no formato do corpo de prova, podendo miniaturizar as espécimes e testá-las em diferentes condições de atmosfera ou medir a tenacidade à fratura de materiais que não podem ser obtidos por outros métodos, por exemplo. Esta miniaturização faz com que o custo do teste seja menor em comparação aos demais. O objetivo deste trabalho é levantar todos os custos para se produzir em baixa escala os corpos de prova utilizados nos ensaios SNTT. Estes custos foram baseados nos processos feitos no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Estima-se que o custo de produção desse corpo a partir de uma barra de aço AISI 4340, somando-se toda mão-de-obra direta e indireta, custo de ferramentas e maquinário, é de aproximadamente US\$ 43,00.

Palavras-chave: Corpo de prova, Método SNTT, Levantamento de custos, baixa escala.

CIBIEN, R. B. **EVALUATION OF SNTT SPECIMEN'S HELICOIDAL NOTCH**. 2021.
Final Undergraduate Project, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Brazil.

Abstract

It is extremely important for the structural designer to know the mechanical properties of the chosen material and, for this, tests are carried out to determine the specific properties of each material. Currently, several new materials are developed around the world for various purposes, from semiconductor ceramics to 3D printing polymers. These new materials need to have their properties tested and validated accurately by testing replicable under different conditions. The Spiral Notch Torsion Test (SNTT) was developed to address the limitations of ASTM E399 standardized tests, which are often limited by the shape effect. In addition to overcoming the technical limitations of these tests, this new method also innovates in the format of the specimen, being able to miniaturize the specimens and test them in different atmospheric conditions or calculate the fracture toughness of materials that can't be determined by another type of test, for example. This kind of miniaturization makes the test cost less compared to others. The objective of this project is to raise the costs to produce in low-volume the specimens used in the SNTT tests. These costs were based on processes carried out in the LTAD Laboratory of the Federal University of Uberlândia (UFU). It is estimated that the production of this body from an AISI 4340 steel bar, undergoing heat treatment to normalize the material properties and machining, costs approximately US\$ 43.00.

Keywords: Specimen, SNTT method, Sourcing, Low-volume.

Lista de Figuras

Figura 2.1	Classificação dos processos de fabricação (MACHADO et al., 2009) ...	4
Figura 2.2	Representação do movimento de corte nas operações de torneamento e fresamento (SENAI, 1998)	5
Figura 2.3	Representação do movimento de avanço nos processos de torneamento e fresamento (SENAI, 1998)	5
Figura 2.4	Velocidade de corte nos movimentos rotativos (adaptado de SENAI, 1998)	6
Figura 2.5	Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante (MACHADO et al., 2009) ..	6
Figura 2.6	Profundidade ou largura de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento tangencial discordante (MACHADO et al., 2009)	7
Figura 2.7	Torneamento longitudinal (1), torneamento de perfil (2) e faceamento (3). (Sandvik Coromant)	8
Figura 2.8	Fresamento Frontal (a) e Fresamento Periférico (b) (adaptado de POLLI, 2005)	9
Figura 2.9	Rosqueamento externo (a) e rosqueamento externo com fresa de perfil único (b) (adaptado de SENAI, 1998)	10
Figura 3.1	Configuração do teste SNTT (WANG et al., 2012)	13
Figura 3.2	Desenho técnico do corpo de prova utilizado no método SNTT (O AUTOR, 2021)	15
Figura 3.3	Desenho técnico do entalhe (O AUTOR, 2021)	15

Figura 3.4	Fluxograma do processo de fabricação do corpo de prova SNTT	16
Figura 3.5	Serra Fita Franho modelo FM 1600 (ANHANGUERA, 2021)	17
Figura 3.6	Forno mufla Jung (JUNG, 2021)	17
Figura 3.7	Óleo de Têmpera (Loja do Cuteleiro, 2021)	17
Figura 3.8	Centro de torneamento ROMI GL 240M	18
Figura 3.9	Fresadora de bancada MANROD MR-206	20
Figura 4.1	Tempo para produzir uma peça em cada máquina-ferramenta	22
Figura 4.2	Gráfico da distribuição dos valores que compõem o custo total por hora das máquinas	26
Figura 4.3	Gráfico da distribuição dos custos das máquinas para fabricar uma peça	27
Figura 4.4	Gráfico da distribuição dos custos dos materiais e ferramentas utilizados para fabricar uma peça	28
Figura 5.1	Gráfico pizza distribuindo os custos que compõem o custo total	30

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Parâmetros do processo de desbaste	18
Tabela 3.2	Parâmetros do processo de rosqueamento	19
Tabela 3.3	Parâmetros do processo de usinagem do entalhe helicoidal	19
Tabela 3.4	Parâmetros do processo de desbaste	20
Tabela 4.1	Tempo dos processos de preparação do material	21
Tabela 4.2	Tempo dos processos de usinagem	22
Tabela 4.3	Ferramentas utilizadas no torno ROMI GL 240M	23
Tabela 4.4	Custo das ferramentas	23
Tabela 4.5	Levantamento de custos de mão-de-obra direta (MOD)	24
Tabela 4.6	Levantamento de custos de hora de trabalho	25
Tabela 4.7	Levantamento de custos de máquina para fabricar uma peça	26
Tabela 4.8	Levantamento de custos de material para fabricar uma peça	28

Lista de Símbolos e Siglas

a_e = Penetração de trabalho

a_f = Penetração de avanço

a_p = Profundidade de usinagem

AISI = *American Iron and Steel Institute*

ASTM = *American Society of Testing*

C(T) = Teste Compacto de Tração

CAD = *Computer-aided design*

CAM = *Computer-aided manufacture*

CNC = *Computerized Numerical Control*

EUA = Estados Unidos da América

f = Avanço

f_c = Avanço de corte

f_e = Avanço efetivo de corte

f_z = Avanço por dente

HRC = Dureza Rockwell

K_{IC} = Tenacidade à Fratura

kW = Quilowatt

LTAD = Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste

m_a = Movimento de avanço

m_c = Movimento de corte

PIB = Produto Interno Bruto

rpm = Rotações por minuto

SNTT = *Spiral Notch Torsion Test*

UFU = Universidade Federal de Uberlândia

US\$ = Dólar americano

v_c = Velocidade de corte

Sumário

Capítulo I	
1. Introdução	1
Capítulo II	
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Usinagem	3
2.1.1. Parâmetros de usinagem	5
2.1.2. Torneamento	7
2.1.3. Fresamento	8
2.1.4. Rosqueamento	9
2.1.5. CNC/CAD/CAM	10
2.2. Custos de produção	11
2.2.1. Produção em baixa escala (low-volume)	11
Capítulo III	
3. Metodologia	13
3.1. Ensaio SNTT	13
3.1.1. Corpo de prova SNTT	14
3.2. Processo de fabricação	16
3.2.1. Preparação	16
3.2.2. Usinagem	18
3.2.2.1. Desbaste	18
3.2.2.2. Rosqueamento	19
3.2.2.3. Entalhe Helicoidal	19
3.2.2.4. Acabamento	20
3.2.2.5. Fresamento	20
Capítulo IV	
4. Levantamento de custos	21
4.1. Tempo dos processos	21
4.2. Ferramentas	22
4.3. Mão-de-obra	24
4.4. Custos totais	26
Capítulo V	
5. Conclusões	29
Referências Bibliográficas	31

Capítulo I

1. Introdução

A maioria dos elementos de um projeto de estrutura é projetado para minimizar a possibilidade de falhas em condições normais de uso. Para isso, conforme Callister e Rethwisch (2018) explicam, o conhecimento sobre como falhas ocorrem é de extrema importância para o projetista e, assim, desenvolver um projeto que não ponha o usuário em risco nem cause prejuízo financeiro.

Duga et al. (1983 apud ANDERSON, 2005) aponta que em 1978, apenas nos Estados Unidos da América (EUA), as perdas decorrentes de falhas estruturais foram de mais de US\$119 bilhões de dólares (valores atualizados para 1982), isso representava aproximadamente 4% do Produto Interno Bruto (PIB). Além disso, no mesmo estudo estimou-se que, na época, esse custo poderia ser reduzido em US\$63 bilhões se houvesse mais investimentos na aplicação e nas pesquisas sobre mecânica da fratura.

A maioria das falhas estruturais podem ser classificadas por duas causas principais, como Anderson (2005) enumera sendo: a negligência na etapa de projeto, de construção ou de utilização; e a aplicação de novas tecnologias, como novos modelos de projeto e uso de novos materiais, que podem gerar resultados não esperados e indesejáveis.

A negligência pode ser minimizada aplicando-se procedimentos de segurança e atenção já existentes, como revisão de projeto, treinamento dos usuários, entre outras ações. Já a segunda classe de causa é mais difícil de ser prevista, pois trata-se da aplicação de novos avanços tecnológicos. Dessa forma deve-se, na etapa de projeto, ter atenção redobrada nos cálculos e, principalmente, ter fontes adequadas e confiáveis das propriedades dos materiais utilizados.

Uma propriedade importante para projetos mecânicos é a Tenacidade à Fratura que representa a resistência do material à propagação de trincas. Quando as tensões aplicadas na ponta da fenda superam um valor crítico, intrínseco ao material, ele cede e ocorre a fratura da peça. A tensão máxima que o material suporta pode ser determinada pela Tenacidade à Fratura no estado plano de tensão (K_{IC}).

Wang e Liu (2004) desenvolveram um novo teste para determinar o K_{IC} aplicando torção pura em um corpo de prova cilíndrico com um entalhe helicoidal em torno deste, sob

um ângulo de passo de 45°. Esta nova forma de ensaio foi chamada de *Spiral Notch Torsion Test* (SNTT) ou, numa tradução livre, Teste de Torção em Entalhe Helicoidal.

O método SNTT foi criado para eliminar o efeito de tamanho, que é um dos principais problemas de outros métodos regulamentados pela norma ASTM E399, como o teste compacto de tração (C(T)). Assim sendo possível miniaturizar o corpo de prova usado. Outra vantagem é o menor custo para implementar este teste, pois o corpo de prova é relativamente de simples fabricação e são necessários menos espécimes para se obter resultados válidos (RAMAN et al., 2007).

Este trabalho tem como objetivo principal o levantamento dos custos de produção dos corpos de prova utilizados no método SNTT. Para tal finalidade, foi levado em consideração os custos de mão-de-obra, maquinário, ferramentas e despesas diversas, como energia elétrica e impostos. Este projeto também descreve detalhadamente os cálculos utilizados para o levantamento de custos de produção em baixa escala.

Capítulo II

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentado a revisão bibliográfica dos principais tópicos para o desenvolvimento deste trabalho, como os processos de fabricação (usinagem) e o levantamento de custos.

2.1. Usinagem

Os processos de manufatura podem ser entendidos como todo processo de transformação de uma matéria-prima num produto acabado através de planos de fabricação bem organizados e, em países industrializados, esse tipo de indústria corresponde a aproximadamente $\frac{1}{3}$ do Produto Interno Bruto (PIB), segundo Kalpakjian (1995, apud MACHADO et al., 2009).

A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo (TRENT, 1985, apud MACHADO et al., 2009) e é simplesmente explicada como sendo qualquer processo que remova massa gradualmente de um material (BOOTHROYD e KNIGHT, 2006), ou seja, “o processo de fabricação que remove cavaco”.

Dentro dessa descrição, existem várias formas diferentes para se usinar uma peça. Ferraresi (1970) as divide em dois grandes grupos: usinagem convencional e não-convencional. Os processos classificados como usinagem convencional utilizam principalmente a energia mecânica para remover o cavaco da peça, enquanto que os processos não-convencionais utilizam outros tipos de energias, sendo em alguns casos uma combinação delas. A Figura 2.1 mostra a divisão feita por Ferraresi (1970) e revisada por Machado et al. (2009).

As operações de usinagem podem ser divididas em duas fases, primeiramente é feito o desbaste e para finalizar é feito o acabamento da peça, podendo ter múltiplas fases de desbaste e acabamento para produzir uma peça usinada. No processo de desbaste ocorre grande retirada de material para diminuir o tempo de trabalho total, porém deve-se obedecer parâmetros para gerar peças adequadas para a próxima operação, geralmente o acabamento, e otimizar a vida útil da ferramenta de corte utilizada (POLLI, 2005).

O acabamento da peça é caracterizado pela obtenção de superfícies com as dimensões mais próximas das definidas em projeto e rugosidade superficial adequada. Neste tipo de

processo, quase não há marcas dos sulcos produzidos pela ferramenta, pois os cavacos obtidos são mais finos em geral (SENAI, 1998).

Mesmo sendo um método amplamente utilizado na indústria, a usinagem é um processo considerado imprevisível (SHAW apud MACHADO et al., 2009). Desta forma, é importantíssimo entender como os parâmetros de entrada afetam o resultado para auxiliar o engenheiro responsável a prever o comportamento do procedimento.



Figura 2.1 - Classificação dos processo de fabricação (MACHADO et al., 2009)

Segundo Machado et al. (2009), os movimentos que resultam diretamente na formação de cavaco são essenciais na teoria da usinagem, pois a partir deles todos os parâmetros são definidos. Sendo assim, os três movimentos principais são:

- Movimento de corte (m_c): é o movimento realizado entre a peça e a ferramenta para remover o material da peça localizado neste percurso, este movimento sozinho promove uma retirada única de cavaco (MACHADO et al., 2009).

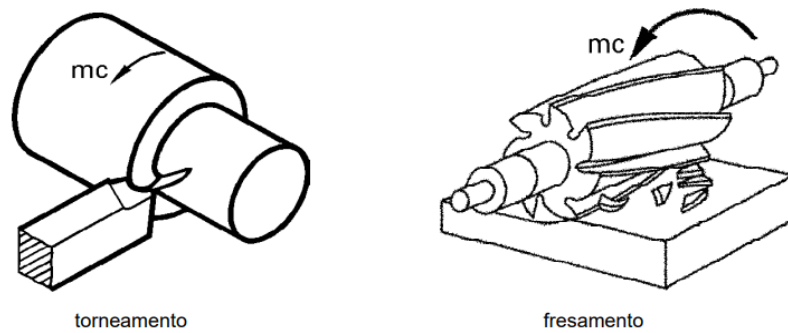


Figura 2.2 - Representação do movimento de corte nas operações de torneamento e fresamento (SENAI, 1998)

- Movimento de avanço (m_a): este movimento possibilita, juntamente com o movimento de corte, a retirada de material da peça continuamente (FERRARESI, 1977).

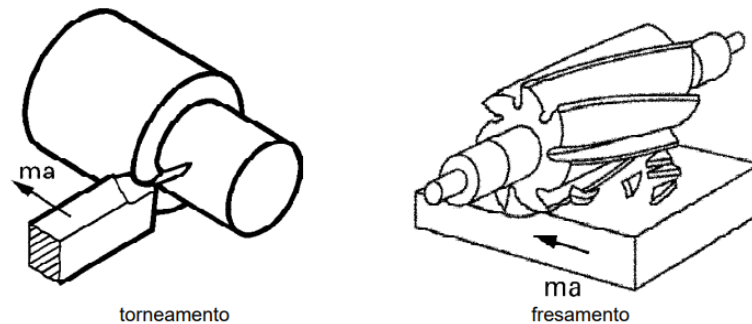


Figura 2.3 - Representação do movimento de avanço nos processos de torneamento e fresamento (SENAI, 1998)

- Movimento efetivo: é a resultante entre os movimentos de corte e de avanço.

2.1.1. Parâmetros de usinagem

A partir dos movimentos citados anteriormente, é possível definir os principais parâmetros utilizados nos processos de usinagem em geral, como a velocidade de corte, a profundidade de usinagem e avanço.

A velocidade de corte (v_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta (MACHADO et al., 2009). Ela é representada em metros por minuto (m/min) e pode ser calculada pela Equação (2.1) quando se trata de processos rotativos, como no torneamento e no fresamento.

$$v_c = \frac{\pi d n}{1000} \quad (2.1)$$

Onde d é o diâmetro da peça ou da ferramenta em milímetros (mm) e n o número de rotações por minuto (rpm).

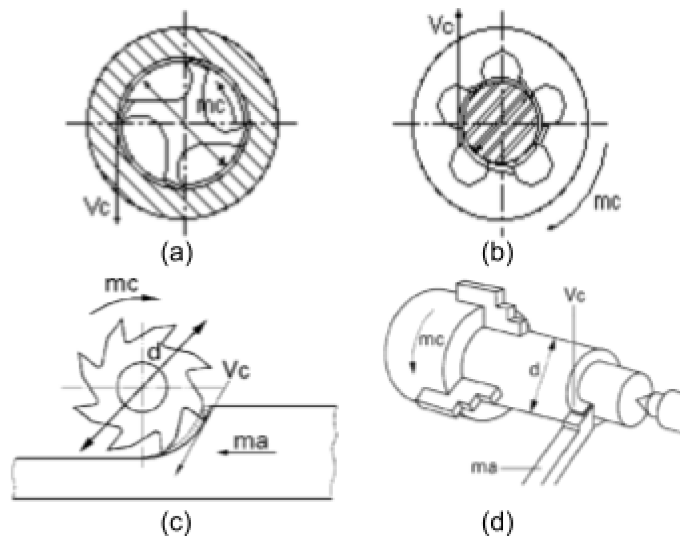


Figura 2.4 - Velocidade de corte nos movimentos rotativos (adaptado de SENAI, 1998)

Avanço (f), segundo Ferraresi (1977), é o percurso de avanço em cada volta (mm/rev) ou em cada curso da ferramenta ($mm/golpe$). Em ferramentas com mais de um dente, existe o avanço por dente (f_z), que é o avanço realizado por cada dente medido na direção do avanço da ferramenta.

Machado et al. (2009) ainda decompõe o avanço por dente em avanço de corte (f_c), que é a projeção do avanço por dente num eixo perpendicular ao movimento de corte, e avanço efetivo de corte (f_e), que representa a projeção do avanço por dente no eixo perpendicular ao movimento efetivo de corte. Estas definições estão representadas na Figura 2.5 e eles são calculados pelas Equações (2.2) e (2.3) respectivamente.

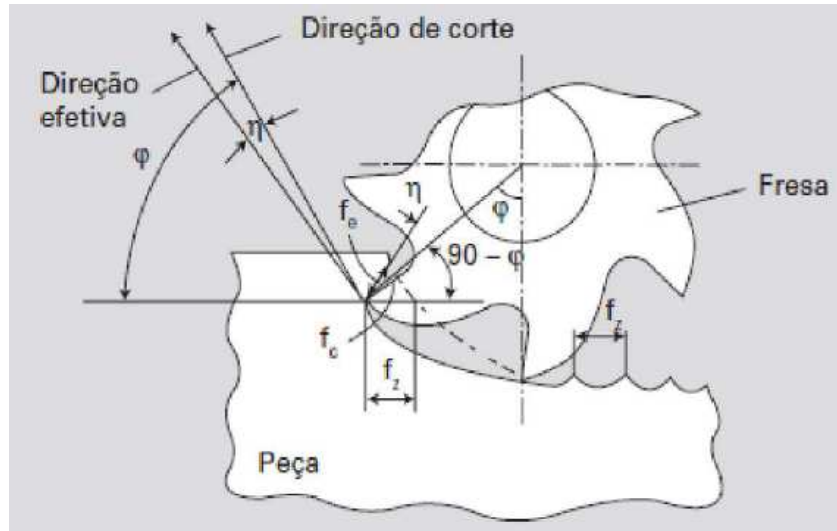


Figura 2.5 - Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo de corte (f_e) no fresamento tangencial discordante (MACHADO et al., 2009)

$$f_c = f_z \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (2.2)$$

$$f_e = f_z \cdot \text{sen}(\varphi - \eta) \quad (2.3)$$

Onde φ é o ângulo da direção de avanço, formado entre o movimento de avanço e o movimento de corte. E η é o ângulo da direção de corte, formado entre o movimento de corte e o movimento efetivo de corte.

A profundidade ou largura de usinagem (a_p) é a largura de penetração da ferramenta na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Já a penetração de trabalho (a_e) é definida como a penetração da ferramenta na peça medida no plano de trabalho numa direção perpendicular ao movimento de avanço. Este parâmetro é principalmente usado nos processos de fresamento e retificação. E a penetração de avanço (a_f) é a grandeza que representa a penetração da ferramenta na peça medida no plano de trabalho e na direção do movimento de avanço (MACHADO et al., 2009). Estes parâmetros estão representados na Figura 2.6.

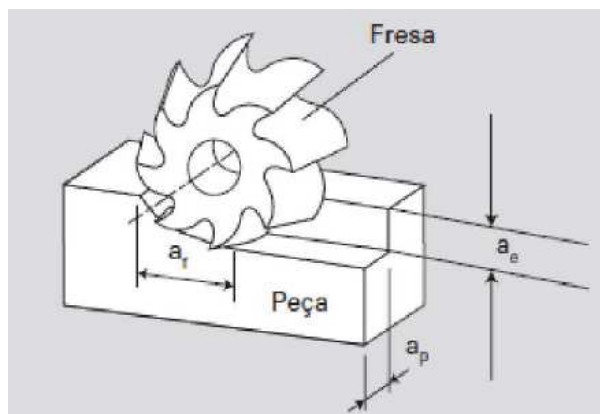


Figura 2.6 - Profundidade ou largura de usinagem (a_p), penetração de trabalho (a_e) e penetração de avanço (a_f) no fresamento tangencial discordante (MACHADO et al., 2009).

2.1.2. Torneamento

Segundo Ferraresi (1977), torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas de corte. Para isso, a peça a ser trabalhada rotaciona sobre um eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca numa trajetória no mesmo plano que contém o eixo de rotação da peça.

A fabricante de equipamentos para usinagem, Sandvik Coromant (2021), afirma que o torneamento é o processo de usinagem mais comum e um dos mais otimizados. Além disso, a fabricante define o torneamento externo sendo a operação de remoção de massa a fim de reduzir o diâmetro externo da peça, podendo ser realizado por três movimentos básicos: o torneamento longitudinal, o perfilamento e o faceamento.

O torneamento longitudinal é o processo de usinagem no qual o movimento de avanço da peça ocorre ao longo do eixo de rotação da mesma. Desta forma, esta operação diminui o diâmetro da peça uniformemente até o tamanho desejado. A Sandvik Coromant (2021) afirma que esta é a operação de torneamento mais comum na indústria.

A Sandvik Coromant (2021) diferencia o torneamento de perfil, ou perfilamento, do torneamento longitudinal pelo fato desse primeiro processo poder variar o diâmetro externo da peça final, variando a profundidade do corte, o avanço e a velocidade para se obter o perfil desejado. Este tipo de operação sujeita a ferramenta usada grandes variações de tensões devido aos diferentes movimentos de usinagem e mudanças de diâmetro.

Já no faceamento, a ferramenta avança radialmente na direção do centro da peça, este tipo de operação envolve altas forças de cortes que podem gerar flexão na peça e vibrações excessivas. A Figura 2.7 demonstra as diferenças entre os processos descritos acima.



Figura 2.7 - Torneamento longitudinal (1), torneamento de perfil (2) e faceamento (3). (Sandvik Coromant)

2.1.3. Fresamento

Machado et al. (2009) afirma que o processo de fresamento é uma das formas de usinagem mais versáteis para produção de geometrias diversas. Diferentemente do torneamento onde a peça gira em torno de um eixo e a ferramenta de corte faz um movimento retilíneo, nesse tipo de operação a peça se movimenta sobre um plano, ou até mesmo fica fixada sobre a mesa, enquanto a ferramenta gira e realiza a remoção de material.

Esta operação se caracteriza pelo fato que cada dente da fresa não fica em contato com a peça durante todo processo devido aos movimentos de corte, o que segundo Drozda (1983) faz com que pequenos pedaços de cavacos sejam gerados. Desta forma as operações de fresamento garantem altas taxas de remoção de material e podem gerar superfícies com pouca rugosidade.

O fresamento pode ser dividido em duas grandes categorias: frontal (plano) ou periférico (tangencial). Esta categorização é feita a partir do posicionamento dos gumes na fresa e, desta forma, do movimento feito pela ferramenta para remoção de cavaco. As outras formas de fresamento são derivadas desses dois tipos principais (POLLI, 2005).

Segundo Polli (2005), no fresamento frontal os gumes estão localizados na extremidade externa e na face frontal da fresa e normalmente a superfície usinada é plana. Já o fresamento periférico é caracterizado pela localização dos gumes na periferia da fresa num plano paralelo ao eixo da ferramenta.

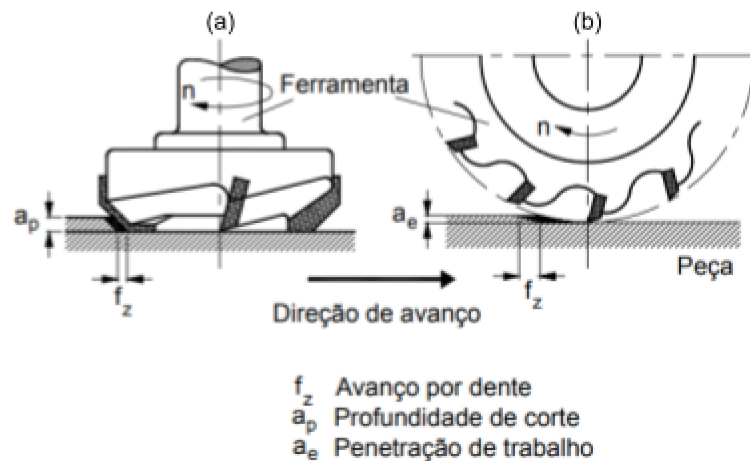


Figura 2.8 - Fresamento Frontal (a) e Fresamento Periférico (b) (adaptado de POLLI, 2005)

2.1.4. Rosqueamento

Rosqueamento é o processo para confeccionar elementos de fixação e elementos para transmissão de movimentos, como porcas, parafusos e fusos. Várias máquinas diferentes podem realizar esta operação, pois tanto tornos quanto fresadoras conseguem produzir este tipo de elemento. O que limita esta operação é a taxa de produção esperada e as dimensões da rosca (MACHADO et al., 2009). A Figura 2.9 representa o processo de rosqueamento sendo realizado em um torno mecânico e com uma fresa como ferramenta de corte.

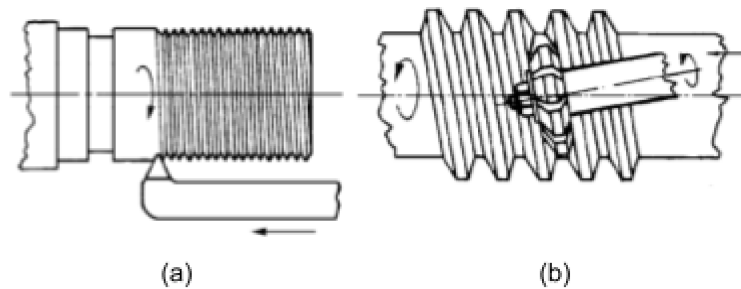


Figura 2.9 - Rosqueamento externo (a) e rosqueamento externo com fresa de perfil único (b) (adaptado de SENAI, 1998).

2.1.5. CNC/CAD/CAM

O desenvolvimento de computadores capazes de realizar cálculos e comandos precisos rapidamente e de forma financeiramente acessível, fez com que essas máquinas fossem aplicadas em diversos setores da indústria a partir de meados do século XX. Assim surgiram as “Máquinas Comandadas Numericamente” (*Computerized Numerical Control - CNC*) e, aplicadas à manufatura, possibilitaram a produção de peças de geometria complexa em materiais considerados anteriormente de difícil usinabilidade (MACHADO et al., 2009).

Segundo Oliveira (2011), a tecnologia CNC pode ser aplicada nos diversos processos de fabricação, como o fresamento, torneamento, dobramento e corte. O controle feito por esse tipo de sistema possibilita a reprodutibilidade de processos repetitivos porém complexos e, desta forma, viabiliza a confecção de produtos de variadas formas geométricas.

Além de auxiliar no processo de fabricação, os computadores estão presentes no desenvolvimento dos produtos através dos *softwares* de projeto assistido por computador (*Computer-aided design* - CAD) e fabricação assistida por computador (*Computer-aided manufacture* - CAM). Segundo Boothroyd e Knight (2006), os *softwares* de CAD/CAM são usados para otimizar os processos de criação e execução, integrando design de produto até os processos de manufatura.

Autodesk ®, líder em *software* 3D de projeto, engenharia e entretenimento, afirma que “o software CAM usa os modelos e as montagens criadas no software CAD a fim de gerar percursos para as máquinas-ferramentas converterem os projetos em peças físicas” (AUTODESK, 2020).

2.2. Custos de produção

Saber os custos de produção é deveras importante para entender se o preço praticado no mercado, ou oferecido pelo fornecedor, está justo, além de possibilitar a otimização dos processos de produção e reduzir os custos finais. Martins (2001 apud PEIXOTO et al., 2008) ressalta que “a contabilidade de custos mais moderna vem criando sistemas de informações que permitam melhor gerenciamento de custos, com base nesse enfoque”.

Stemmer (1993) afirma que o custo de produção está diretamente ligado ao tempo necessário para realizar tal operação e, no caso dos processos de usinagem, o tempo de execução depende, principalmente, da usinabilidade do material utilizado e outros fatores mais gerais. Para reduzir o tempo de manufatura total deve-se estudar todas as etapas da produção, desde a preparação da matéria-prima e dos meios de produção até a vida útil da ferramenta utilizada.

O desgaste da ferramenta de usinagem é influenciada pelos parâmetros de usinagem, principalmente pela velocidade de corte, segundo Machado et al. (2009). Quando a velocidade de usinagem aumenta, o tempo de usinagem diminui, porém a vida útil da ferramenta também se deteriora. O tempo de troca das ferramentas desgastadas em linhas de produção de grande escala podem ser tão longos que, durante esse tempo parado para troca, poderiam ser usinadas várias peças, assim, aumentando o tempo total de produção e os custos de produção.

Para Boothroyd e Knight (2006), a análise de custos de produção pode se tornar muito complicada devido ao vários fatores envolvidos e, em vários casos, esta análise minuciosa só será possível para uma determinada etapa do processo. Ainda, Boothroyd e Knight (2006) focam essa análise no tempo de produção para finalizar uma peça, que em geral passa por todos os processos presentes na linha.

Além dos custos de produção definidos pelo tempo de operação, também deve se levar em consideração os custos pela mão-de-obra dos operadores, assim como a depreciação das máquinas-ferramenta utilizadas e suas eventuais manutenções (BOOTHROYD e KNIGHT, 2006).

2.2.1. Produção em baixa escala (*low-volume*)

Durante o último século, a crescente demanda por produtos baratos e de fácil acesso, fez com que várias fábricas e linhas de produção fossem criadas para agilizar e baratear os custos de produção, isto é conhecido como “produção em massa”. Porém, outros tipos de

manufatura existem, como a produção de equipamentos médicos, protótipos e placas de circuitos personalizadas. Segundo Schneider (2010), este tipo de produção é chamada de *low-volume production*, ou, em tradução livre, produção de baixa escala.

A produção em baixa escala enfrenta barreiras diferentes das produções em massa. Este último modo de operação se baseia no alto volume de produtos produzidos num tempo curto, com processos e máquinas extremamente otimizados para este fim, enquanto o primeiro se limita às máquinas e processos já existentes e “genéricos”, mesmo muitas vezes produzindo produtos finais com mais tecnologia (BLAHA, 2002).

Blaha (2002) defende que os métodos utilizados para análise de custos na produção em baixa escala deve ser diferente da usada pelas grandes fábricas. Além disso, vários autores (VAROTSIS, 2018; SCHNEIDER, 2010; HUANG, 2020) citam a importância do conhecimento dos processos de produção necessários e ter boas relações com os fornecedores para ter maior eficiência internamente e produtos de qualidade.

Capítulo III

3. Metodologia

Este capítulo descreve as etapas, recursos e métodos utilizados para o suporte do trabalho, onde é simulado uma linha de produção para a fabricação dos corpos de prova utilizados nos testes de torção em entalhe helicoidal (*Spiral Notch Torsion Test* - SNTT).^o

3.1. Ensaio SNTT

Wang et al. (2000) desenvolveram um novo método para determinar a tenacidade à fratura (K_{IC}) de qualquer material, com corpos de prova em formato cilíndrico com um entalhe helicoidal de passo único de 45°, aplicando-se torção pura nesta espécime. Esse novo teste foi nomeado como *Spiral Notch Torsion Test* (SNTT), ou Teste de Torção em Entalhe Helicoidal em tradução livre. A Figura 3.1 apresenta de forma esquematizada a teoria utilizada para realizar o teste SNTT.

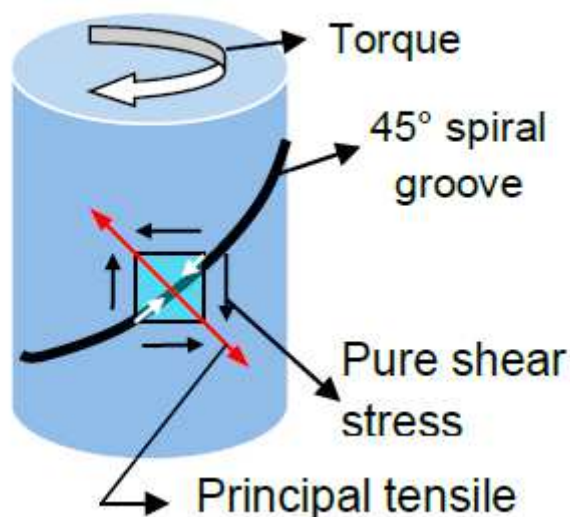


Figura 3.1 - Configuração do teste SNTT (WANG et al., 2012)

Os estudos posteriores (WANG et al., 2008, 2010 apud RODRIGUES, 2020; WANG et al. 2000, 2004, 2012, 2014) sobre o SNTT não definiram uma metodologia precisa para obtenção dos valores de K_{IC} . Rodrigues (2020) elaborou e descreveu as metodologias utilizadas para comparar os resultados obtidos pelo SNTT com o teste compacto de tração (C(T)) descrito na norma ASTM E399 (ASTM, 2020), sendo este último uma metodologia conceituada e muito utilizada em todo o mundo.

O teste SNTT foi desenvolvido para superar algumas limitações dos testes mais tradicionais, como o tamanho do corpo de prova. Segundo Wang et al. (2004), o método SNTT é capaz de testar corpos de prova menores que os aceitos em outros testes, assim, inovando tanto no *design* do corpo de prova quanto na forma de aplicação de carga. Isto possibilita ensaiar materiais que não poderiam ter o K_{IC} determinado diretamente com o método convencional.

Wang e Liu (2015 apud RODRIGUES, 2020) descrevem o método SNTT como sendo um teste onde aplica-se um torque na extremidade do corpo de prova. Esta torção pura combinada com entalhe de 45° resulta no *modo I* puro na frente da trinca e a predominância do estado plano de deformação, e sendo assim, determina o K_{IC} . Este teste é dividido em duas etapas: a abertura da pré-trinca por fadiga e o carregamento monotônico. A presença desta pré-trinca é muito importante para a obtenção do K_{IC} , pois simula de forma realista as trincas e início de falhas dos componentes estruturais em condições de operação normais.

3.1.1. Corpo de prova SNTT

O corpo de prova desenvolvido para estimar os custos de produção foi baseado na dissertação de mestrado do Guilherme B. Rodrigues (2020). Este corpo é feito da liga de aço AISI 4340, que é considerado um aço para beneficiamento, ou seja, ele possui boa temperabilidade e pode ser usado em diversas finalidades dependendo do tratamento térmico realizado.

Por questões de comparabilidade de resultados do teste SNTT com a norma ASTM E399 (ASTM, 2020), determinou-se que os corpos de prova deveria ter uma dureza de 45 HRC. Para se obter esta dureza, é realizado o tratamento térmico de têmpera em óleo à 850°C seguido de revenimento à 420°C . Devido à capacidade das máquinas utilizadas nos testes SNTT no Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) na UFU, o diâmetro da seção útil do corpo de prova (D) foi definido em 10 mm.

O diâmetro externo foi definido a partir do encaixe na das garras de fixação na máquina de torção utilizada, que é uma rosca $M8 \times 1,25$ fêmea, desta forma a extremidade do corpo de prova ficou como o mostrado na Figura 3.2. A profundidade do entalhe (a_e) foi escolhida devida a razão especificada no projeto $a_e/D = 0,1$, assim ela ficou definida como 1 mm, como é mostrado na Figura 3.3.

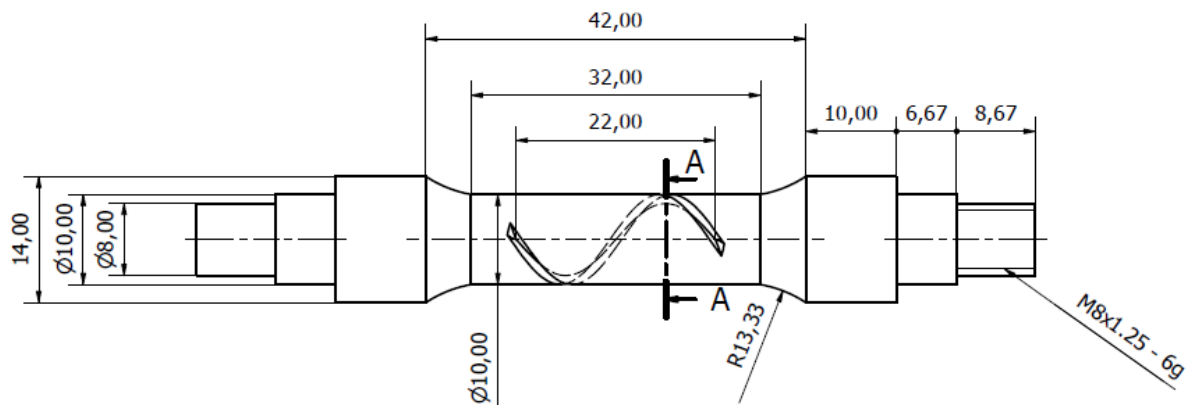


Figura 3.2 - Desenho técnico do corpo de prova utilizado no método SNTT (O AUTOR, 2021).

A-A (2 : 1)

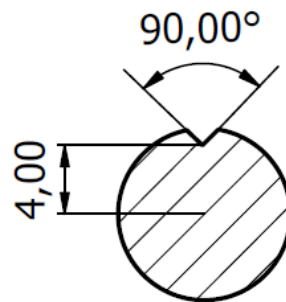


Figura 3.3 - Desenho técnico do entalhe (O AUTOR, 2021)

Para realizar o SNTT, deve-se abrir uma pré-trinca no entalhe, porém não será contabilizada esta etapa do processo no levantamento de custos pois entende-se que esta etapa não faz parte da fabricação do corpo de prova, mas do teste em si.

3.2. Processo de fabricação

O processo de fabricação descrito neste tópico leva em consideração os procedimentos realizados no Laboratório de Tecnologia de Atrito e Desgaste (LTAD) da UFU. A fabricação do corpo de prova pode ser dividida em duas etapas, a preparação da matéria-prima bruta e usinagem da peça. As etapas são detalhadas no decorrer deste tópico.

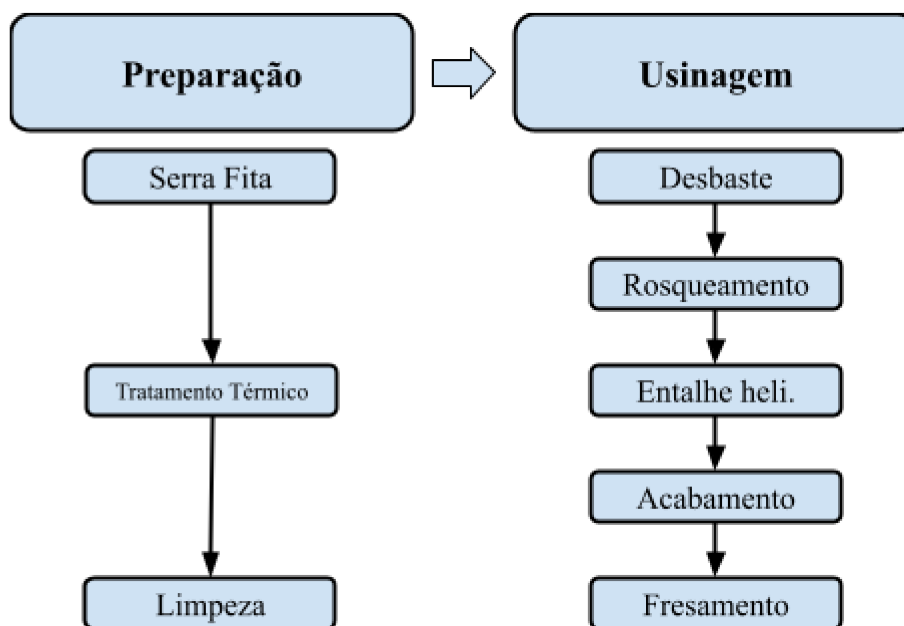


Figura 3.4 - Fluxograma do processo de fabricação do corpo de prova SNTT.

3.2.1. Preparação

A matéria-prima definida previamente é o aço AISI 4340 e a melhor forma para comprá-lo para se fabricar os corpos de prova é na forma de barras de 1 *polegada* de diâmetro e comprimento de 12,6 *m*. Desta forma, é necessário cortá-lo em cilindros menores de 160 *mm*, por questão de limite do torno CNC utilizado.

Para este processo é utilizado uma serra de fita da fabricante FRANHO, modelo FM 1600 (Figura 3.5) e necessita-se da supervisão de um técnico. Estima-se que este processo demore 10 horas por barra. A fita de corte utilizada são as serras 3/4 de corte até 6".

O processo de tratamento térmico é feito num forno do fabricante Jung, modelo 2313 (Figura 3.6), com capacidade de 23 *L*, atinge temperatura máxima de 1300 °C e possui controle automático de temperatura tanto para aquecimento quanto para resfriamento. A potência deste forno, no catálogo, é de 4 *kW*. Este processo dura 8 *horas* e cabem 5 peças

por forno. As peças após esses processos devem ser limpas manualmente por um técnico antes de serem enviadas para a usinagem.

O tratamento térmico é necessário para que o material tenha a dureza requerida (45 HRC) e os testes tenham melhor repetibilidade e maior confiabilidade. De acordo com Rodrigues (2020), este processo se dá em duas fases: têmpera em óleo de têmpera comum (Figura 3.7) com austenitização a 850°C e em seguida é feito revenimento do material a uma temperatura de 420°C .



Figura 3.5 - Serra Fita Franho modelo FM 1600 (ANHANGUERA, 2021).

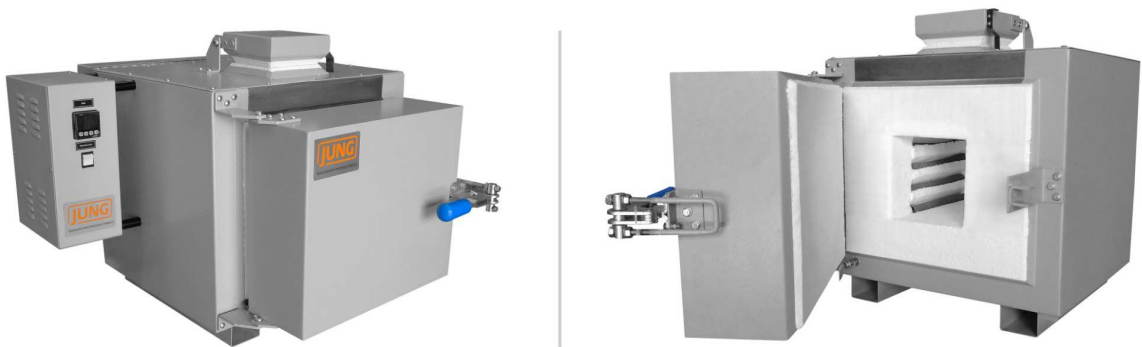


Figura 3.6 - Forno mufla Jung (JUNG, 2021).



Figura 3.7 - Óleo de Têmpera (Loja do Couteleiro, 2021)

3.2.2. Usinagem

A maior parte dos processos de usinagem são feitos no torno CNC da fabricante ROMI modelo GL 240M (Figura 3.8) e apenas a seção quadrada é feita na fresadora manual da fabricante MANROD modelo MR-206 (Figura 3.9). Este processo ao todo demora cerca de 60 minutos, sendo que 40 minutos são no torno CNC e o restante na fresadora.



Figura 3.8 - Centro de torneamento ROMI GL 240M

3.2.2.1. Desbaste

Como descrito anteriormente, o procedimento de desbaste ocorre em velocidades de corte mais altas para otimizar o tempo necessário para usinar o material, porém a superfície usinada não possui boa qualidade. Desta forma, este processo remove material até um diâmetro próximo ao final, mas deixando ainda uma faixa de material para que seja removida no processo de acabamento mais adiante.

Nesta etapa é utilizada a pastilha VBMT 16 04 04-MF 1115 da fabricante Sandvik no torno CNC da ROMI. Esta pastilha pode usar até vinte corpos de prova com dureza de 45 HRC. Os parâmetros utilizados neste procedimento são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros do processo de desbaste.

Parâmetro	Valor
Rotação	1000 <i>rpm</i>
Incremento	0,3 <i>mm</i>
Avanço	0,1 <i>mm/rev</i>

3.2.2.2. Rosqueamento

Esta etapa também é realizada no torno CNC da ROMI logo após o desbaste. A rosca usinada é utilizada para fixar o corpo de prova na máquina de teste e ela é feita em apenas em uma das extremidades como mostrado na Figura 3.2.

Para este procedimento é utilizado um tipo especial de pastilha, pois trata-se de um processo de rosqueamento externo realizado em um torno e necessita-se de um suporte também. A pastilha utilizada é a SMALL 1616K 3 e MATL 3 60-N 1025 como suporte, ambos são fabricados pela Sandvik. A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros utilizados para esta operação.

Tabela 3.2: Parâmetros do processo de rosqueamento.

Parâmetro	Valor
Rotação	400 <i>rpm</i>
Incremento	0,05 <i>mm</i>

3.2.2.3. Entalhe Helicoidal

O entalhe helicoidal é a característica principal deste corpo de prova. Para fazê-lo é utilizado uma ferramenta rotativa no torno CNC utilizada para fabricação de chanfros, a fresa 316-10CM400-10045G 1030, também da fabricante Sandvik. Diferentemente das outras pastilhas que podem usinar até 20 corpos de prova, esta suporta a usinagem de apenas 10 corpos de prova.

Este processo é o mais complexo da parte de usinagem, mesmo usando um torno controlado computacionalmente, demanda-se aproximadamente 16 minutos para sua conclusão em um corpo de prova. Nesta operação são utilizados os parâmetros contidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros do processo de usinagem do entalhe helicoidal.

Parâmetro	Valor
Rotação	100 <i>rpm</i>
Incremento	0,05 <i>mm</i>

3.2.2.4. Acabamento

O acabamento é feito para que as dimensões requeridas sejam atingidas dentro das especificações descritas no projeto. Nesta etapa são usadas velocidades de corte menores para que o acabamento superficial seja o melhor possível.

A pastilha utilizada é a mesma utilizada na etapa de desbaste, a Sandvik VBMT 16 04 04-MF 1115, porém os parâmetros de usinagem são diferentes, como é mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros do processo de desbaste.

Parâmetro	Valor
Rotação	850 <i>rpm</i>
Incremento	0,3 <i>mm</i>
Avanço	0,1 <i>mm/rev</i>

3.2.2.5. Fresamento

Após as etapas realizadas no torno CNC da ROMI como descritas anteriormente pelas seções 3.2.2.1 até 3.2.2.4, a peça é removida para a fresadora de bancada MANROD, modelo MR-206 por um técnico e lá as seções quadradas são usinadas. Este processo é realizado manualmente pelo técnico responsável e demora cerca de 20 minutos desde o primeiro posicionamento até o término da usinagem.



Figura 3.9 - Fresadora de bancada MANROD, modelo MR-206

Capítulo IV

4. Levantamento de custos

Utilizando das informações cedidas pelo Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD) da UFU, foi possível levantar os custos e tempos de processo necessários para a fabricação do corpo de prova do método SNTT.

4.1. Tempo dos processos

Os tempos descritos nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram adquiridos de forma empírica pelos técnicos e engenheiros do LTAD, assim, são tempos aproximados. Como se trata da fabricação de corpos de prova, esta linha de produção deve ser bem flexível, podendo ser adaptada para a fabricação para outros tipos de teste.

Tabela 4.1: Tempo dos processos de preparação do material.

Processo	Tempo gasto
Corte na serra de fita	10 horas por barra
Tratamento térmico	8 horas por lote*
Limpeza	menos de 1 minuto por espécime

*lote = 5 peças

Como descrito na seção 3.2.1 deste trabalho, cada barra utilizada possui 12,6 m e pode fabricar até 78 peças de 160 mm, desta forma, uma peça é confeccionada a cada 8 minutos, aproximadamente. Assim, para formar um lote de 5 peças que serão levadas ao forno para receber o tratamento térmico, demanda-se 40 minutos. Portanto o processo que mais demanda tempo na etapa de preparação é o tratamento térmico, pois a taxa de produção deste processo é de 5 peças a cada 8 horas ou 1 peça a cada 96 minutos (1 hora e 36 minutos).

Os quatro primeiros procedimentos da Tabela 4.2 são realizados no centro de torneamento ROMI GL 240M, então, somando-se os tempos gastos nesses processos, esta máquina produz 1 corpo de prova a cada 40 minutos. Enquanto que o processo na bancada de fresamento demanda-se metade deste tempo para realizar apenas uma etapa do processo de usinagem - gerar as seções quadradas.

Tabela 4.2: Tempo dos processos de usinagem.

Processo	Tempo gasto por corpo de prova
Desbaste	8 minutos
Rosqueamento	8 minutos
Entalhe helicoidal	16 minutos
Acabamento	8 minutos
Fresamento	20 minutos

Para melhor visualização, a Figura 4.1 traz a comparação dos tempos que cada etapa demanda para produzir um corpo de prova. Nota-se que o tratamento térmico é o que demanda mais tempo, porém ele é essencial para a normalização das durezas dos corpos de prova.

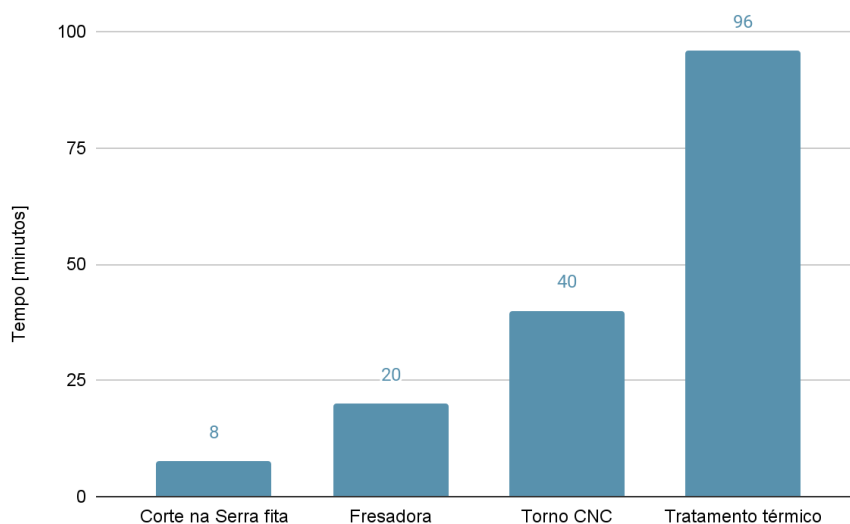


Figura 4.1 - Tempo para produzir uma peça em cada máquina-ferramenta

4.2. Ferramentas

A Tabela 4.3 apresenta as principais ferramentas utilizadas nos processos realizados no centro de torneamento da ROMI, assim como a vida útil de cada componente. Esta vida útil foi estimada empiricamente pelos técnicos e engenheiros do LTAD durante o processo de fabricação dos corpos de prova produzidos anteriormente.

Tabela 4.3: Ferramentas utilizadas no torno ROMI GL 240M.

Processo	Ferramenta	Vida útil
Desbaste	VBMT 16 04 04-MF 1115	20 CPs
Rosqueamento	MATL 3 60-N 1025	20 CPs
Entalhe helicoidal	316-10CM400-10045G 1030	10 CPs
Acabamento	VBMT 16 04 04-MF 1115	20 CPs

CPs = Corpos de Prova

O processo de rosqueamento necessita utilizar um suporte especial, o suporte SMALL 1616K 3, este suporte pode ser utilizado durante muito tempo, assim, foi estimado uma vida útil de 80 corpos de prova. Pode-se observar que a mesma pastilha é utilizada no procedimento de desbaste e acabamento, esta ferramenta, segundo os técnicos e engenheiros do LTAD, pode fabricar até 20 peças completas, ou seja, incluindo os processos de desbaste e acabamento.

Assim, estimou-se o custo ferramental para ser produzido um corpo de prova. Por convenção, os levantamentos de preços são todos feitos em dólar americano para poder ser comparado o custo de produção interno e externo, dentro do país e fora também. A Tabela 4.4 enumera os custos de unidade da ferramenta e o custo dividido pelo montante de peças que podem ser produzidas.

Tabela 4.4: Custo das ferramentas.

Ferramenta	Custo un. [US\$*]	Custo por peça [US\$*]
VBMT 16 04 04-MF 1115	15,03	0,75
MATL 3 60-N 1025	42,52	2,13
316-10CM400-10045G 1030	89,99	9,00
SMALL 1616K 3	108,78	1,36

*US\$ 1,00 = R\$ 5,07, média entre 01/06 e 15/06/2021

Outros materiais são utilizados nos processos, como o óleo de têmpera e a matéria-prima do corpo de prova. Seus valores estimados foram de US\$ 5,64 para 1 L de óleo de têmpera e a barra de AISI 4340 com 1 pol. de diâmetro e 12,6 m de comprimento, US\$ 418,67.

4.3. Mão-de-obra

O cálculo feito para estimar o custo da mão-de-obra baseou-se no tempo necessário em cada máquina-ferramenta para fabricar um corpo de prova. Também considerou-se a necessidade de um técnico acompanhar cada etapa, ou seja, mão-de-obra direta (MOD), além de um engenheiro responsável pelos processos, ou seja, o engenheiro é considerado mão-de-obra indireta (MOI). A Tabela 4.5 descreve como foi levantado os custos de MOD e a Tabela 4.6 demonstra os valores para levantar os custos da hora de trabalho.

Tabela 4.5: Levantamento de custos de mão-de-obra direta (MOD).

Técnico em mecânica	Custo mensal [US\$]
Salário base	613,13
Férias (8,33%)	51,07
13° (8,33%)	51,07
1/3 sobre férias (2,78%)	17,04
Sub-total	732,32
INSS (2,70%)	19,77
FGTS (8,00%)	58,59
Total	810,68

O cálculo do custo de máquina é levantado por hora de trabalho, assim, admitindo-se uma jornada de 220 horas mensais, o custo por hora de MOD é US\$ 3,70. O custo de MOI é considerado sendo 90% do custo de MOD, totalizando US\$ 3,33 por hora.

Tabela 4.6: Levantamento de custos de hora de trabalho.

	Serra Fita	Forno	Torno CNC	Fresadora
Orçamento [US\$]	9.127,92	2.460,05	97.004,75	5.592,45
Vida útil [h]	50.400	50.400	50.400	50.400
Manutenção [US\$]	2.281,98	615,01	24.251,19	1.398,11
Sub-total [US\$/h]	0,23	0,06	2,41	0,14
Custo elétrico [US\$/h]	0,18	0,49	1,83	0,18
Custo MOD [US\$/h]	3,70	3,70	3,70	3,70
Custo MOI [US\$/h]	3,33	3,33	3,33	3,33
Total [US\$/h]	7,43	7,58	11,27	7,35

A estimativa das horas de vida útil da máquina, foi considerado o trabalho durante 3 turnos de 7 horas diárias em 252 dias úteis no ano durante 10 anos e utilização em aproximadamente 95% desse tempo. A manutenção foi considerada como sendo 1/4 do custo inicial da máquina.

O custo de energia elétrica foi calculado a partir das tarifas praticadas pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) de acordo com os dados presentes no site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a potência dos motores principais das máquinas, este valor é especificado nos catálogos de cada equipamento.

A Figura 4.2 foi feita para se ter uma melhor visualização das relações entre os valores que compõem o custo total por hora das máquinas. Percebe-se a influência da mão-de-obra (MOD e MOI) no valor total.

Distribuição dos valores em relação ao custo total

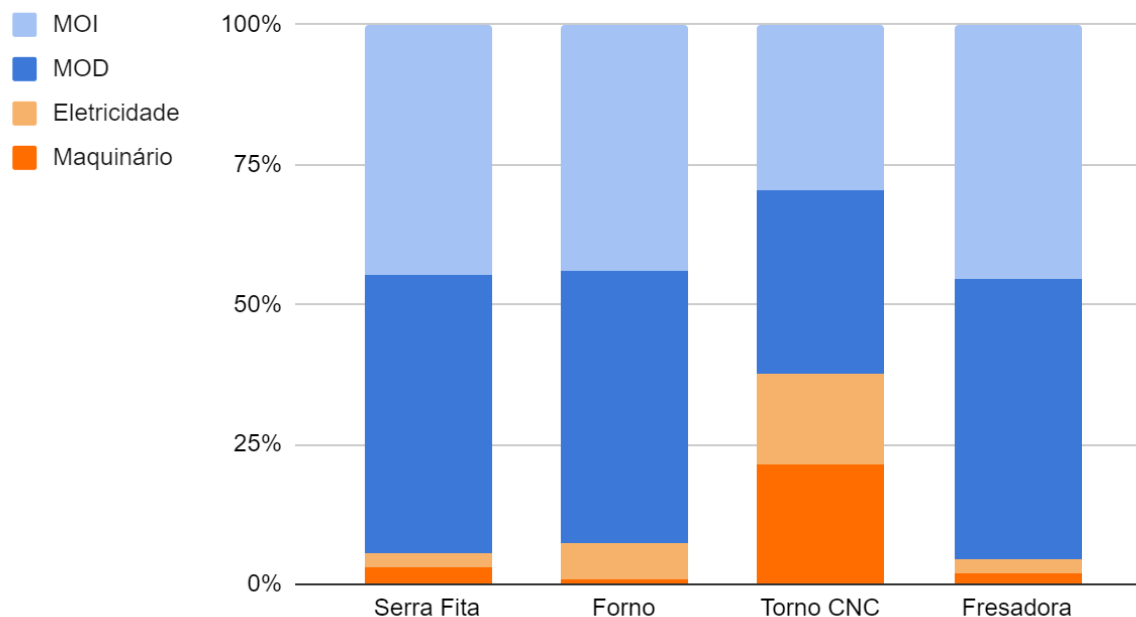


Figura 4.2 - Gráfico da distribuição dos valores que compõem o custo total por hora das máquinas.

4.4. Custos totais

Com o levantamento dos tempos necessários em cada etapa e os custos por hora de cada máquina, é possível levantar os custos envolvidos para fabricar cada peça. Somando-se este custo ao custo das ferramentas citadas neste capítulo, tem-se o custo total para fabricar um corpo de prova SNTT. As Tabela 4.7 e 4.8 agregam todos os valores necessários para este cálculo.

Tabela 4.7: Levantamento de custos de máquina para fabricar uma peça.

Processo	Custo [US\$/h]	Tempo p/ fabricar uma peça [min]	Custo por peça produzida [US\$]
Corte na Serra Fita	7,43	8	0,95
Tratamento Térmico	7,58	96	12,12
Torno CNC	11,27	40	7,50
Fresadora	7,35	20	2,45
Total por peça produzida [US\$]			23,03

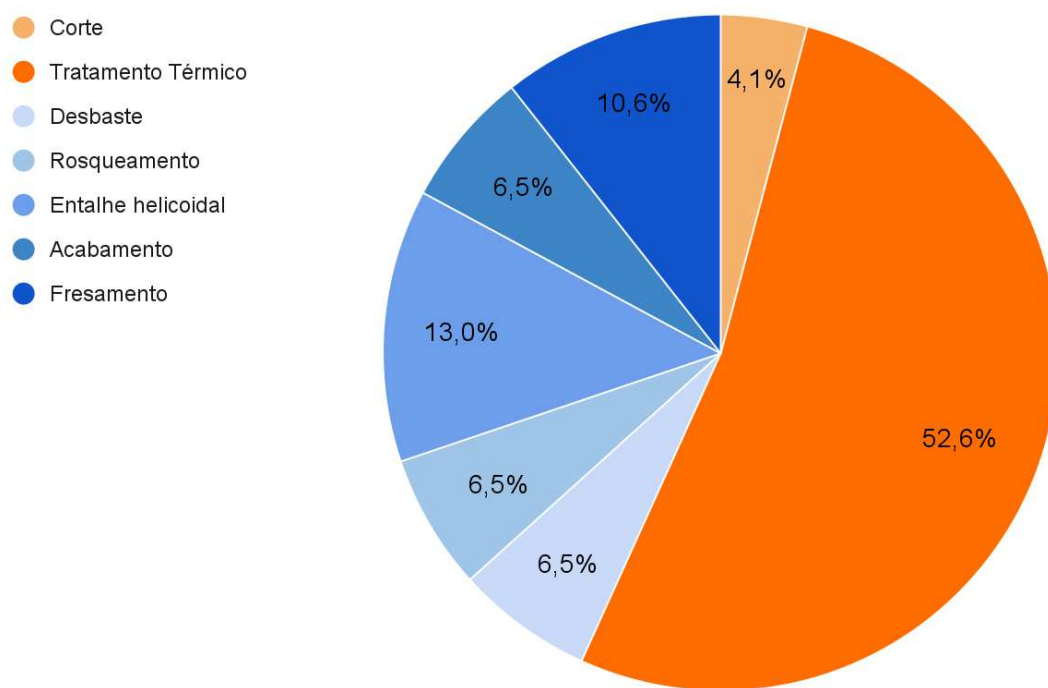


Figura 4.3 - Gráfico da distribuição dos custos das máquinas para fabricar uma peça

Tabela 4.8: Levantamento de custos de material para fabricar uma peça.

Processo	Custo por peça produzida [US\$]
Matéria-prima	5,37
Óleo de têmpera	1,13
Pastilha para Desbaste e Acabamento	0,75
Pastilha para Rosqueamento	2,13
Suporte para Pastilha de Rosqueamento	1,36
Pastilha para usinar a Entalhe Helicoidal	9,00
Total por Peça [US\$]	19,73

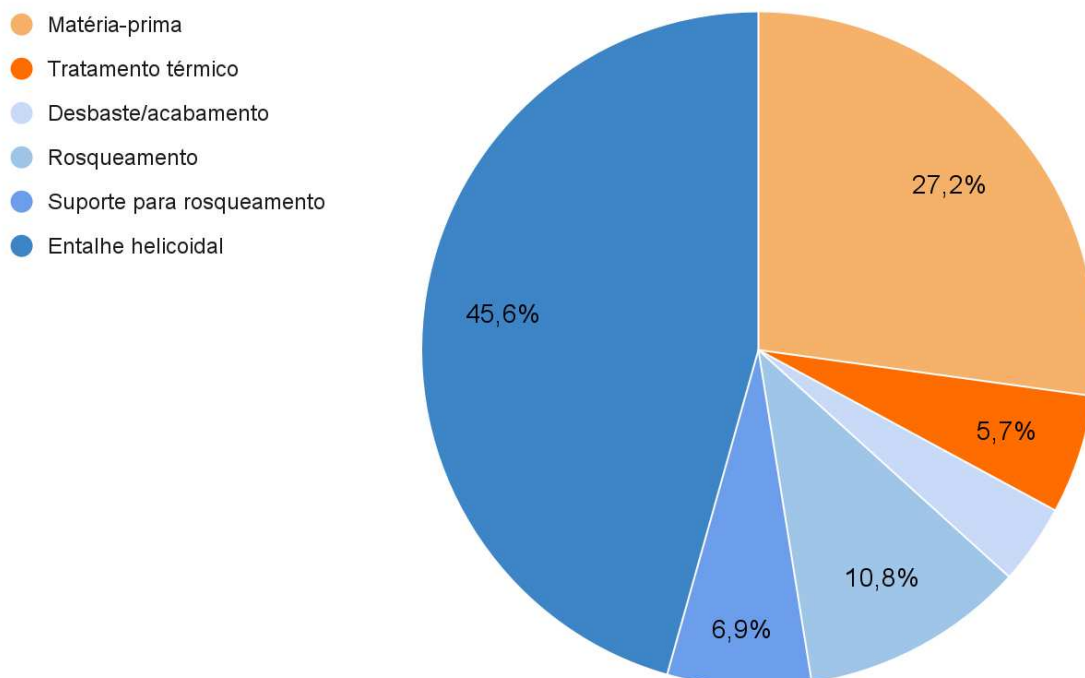


Figura 4.4 - Gráfico da distribuição dos custos dos materiais e ferramentas utilizados para fabricar uma peça.

Capítulo V

5. Conclusões

Através da análise minuciosa dos processos de produção utilizados na fabricação do corpo de prova SNTT descritos no Capítulo III. Utilizando os tempos necessários em cada etapa, custos de mão-de-obra direta e indireta e os orçamentos sobre as ferramentas, materiais e máquinas utilizadas, é possível levantar o custo total de produção em baixa escala deste tipo de espécime.

Portanto, com os valores obtidos no Capítulo IV, pode-se estimar o custo de produção do corpo de prova SNTT como sendo a soma dos custos totais de máquina, *US\$ 23,03*, e os custos ferramentais totais, *US\$ 19,73*, assim ficando um total final de *US\$ 42,77*.

Este valor por peça é alto em comparação às peças produzidas em larga escala, porém este custo é para a produção em baixa escala, como protótipos e produtos customizados. Os valores referentes ao custo da hora de trabalho em cada máquina está de acordo com os valores praticados no mercado nacional, aproximadamente *US\$ 7,50*. Como visualizado na Figura 4.2, o custo de mão-de-obra, somando-se direta e indireta, corresponde até 95,6% do custo por hora de cada máquina.

A Figura 5.1 separa os custos de cada processo e material utilizado para fabricar a peça em questão. As fatias em cores quentes - tons de vermelho e laranja - representam os materiais e processos da etapa de preparação da matéria-prima e as cores mais frias - tons de azul - são os processos e ferramentas da etapa de usinagem.

Custo total - \$ 42,77

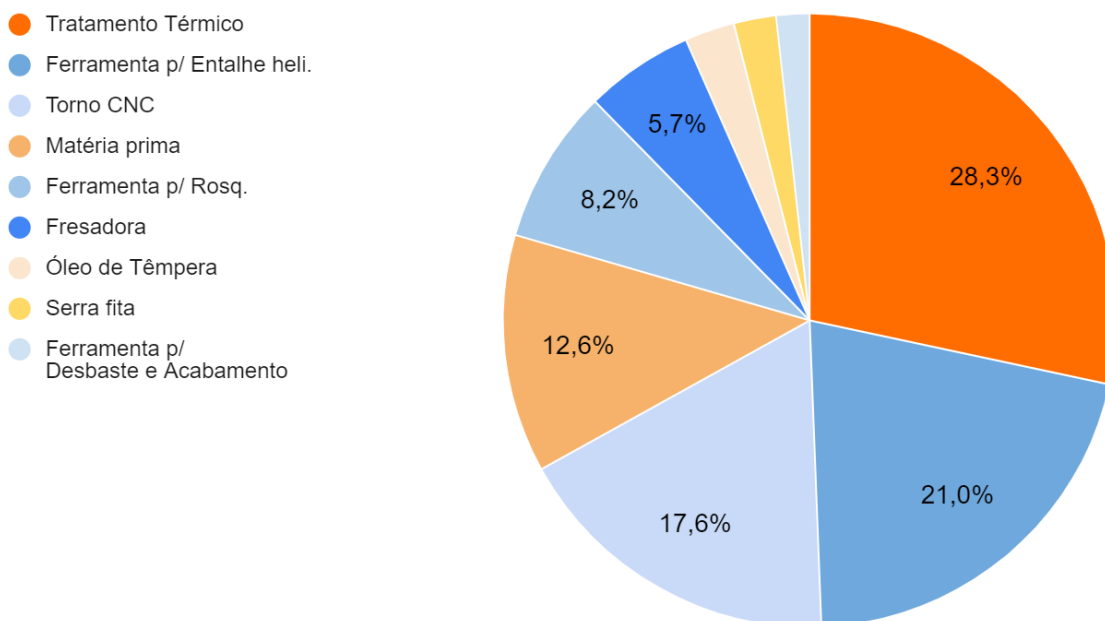


Figura 5.1 - Gráfico pizza distribuindo os custos que compõem o custo total.

Como esperado, o processo mais complexo (abertura do entalhe helicoidal) é o gerador da maior parte do custo total da peça, aproximadamente 38,6%, quando leva-se em consideração os custos da ferramenta utilizada neste processo junto com o custo da hora-máquina do torno CNC utilizado. Porém, o processo mais demorado (Tratamento Térmico) é a maior fatia deste custo quando são considerados os custos separadamente.

Por meio do estudo e conclusões obtidas neste trabalho, pode-se propor alguns temas para trabalhos futuros:

- Estudo de *Make or Buy* do corpo de prova SNTT para analisar as vantagens e desvantagens de se produzir este espécime no laboratório em comparação a comprá-lo pronto de um fornecedor;
- Otimizar o tempo dos processos de fabricação nas máquinas CNC através de *softwares* de CAD / CAM;
- Estudo sobre fornecedores de matéria-prima para levantar melhores opções para receber uma peça com o tamanho e dureza requeridos em projeto, sem a necessidade de realizar a preparação no laboratório.

Referências Bibliográficas

ANDERSON, T. L. “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications”. 3ª edição. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.

ASTM E399, “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”. ASTM International, West Conshohocken, 2020.

Autodesk Inc. ©. “Programa CAD/CAM”. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/solutions/cad-cam>>. Acesso em 05/04/2021.

BLAHA, Dwight Allen. "Design a strategic sourcing process for low volume, high technology products". 2002. 85 f. Dissertação de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge - MA - EUA.

BOOTHROYD, Geoffrey; KNIGHT, Winston A. “Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools”. 3ª edição. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.

CALLISTER, William D., Jr.; RETHWISCH, David G. “Materials science and engineering: an introduction”. 10ª edição. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.

DEANS, Marti. “What is CAM (Computer-aided Manufacturing)?”. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/computer-aided-manufacturing-beginners/>>. Publicado em 27/03/2021. Autodesk Inc. ©. Acesso em 05/04/2021.

DROZDA, T. J.; WICK, C. (Ed.) “Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining”. 4ª edição. Dearborn, Michigan : Society of Manufacturing Engineers, 1983.

FERRARESI, Dino. “Fundamentos da Usinagem dos Metais”. 1ª edição. São Carlos, SP: Edgard Blucher LTDA., 1970.

HUANG, Leon. “The Secret of CNC Prototyping, A Cost Breakdown”. Disponível em: <<https://www.rapidirect.com/blog/the-secret-of-cnc-prototyping-a-cost-breakdown/>>. Publicado em 26/11/2020. Acesso em: 21/06/2021.

LOBO, Alfredo Carlos Orphão. “Qualidade e produtividade”. Publicado em 2003. Disponível em: < <http://repositorios.inmetro.gov.br/handle/10926/760> />. Acesso em 12/03/2021.

MARQUES, Clauber Roberto Melo. “Implementação de um novo processo de usinagem de roscas helicoidais”. Publicado em 26/02/2021. Disponível em <<https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/implementacao-novo-processo-usinagem-roscas-helicoidais/>>. Acesso em 08/03/2021.

OLIVEIRA, Cláudio André L. “Uma metodologia de integração CAD/CAM através da aplicação de ciclos de usinagem na programação CNC”. 2011. 130 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

OVERBY, Alan. “CNC Machining Handbook”. 1ª edition. New York, NY: McGraw Hill, 2010.

POLLI, Milton L. “Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento a altas velocidades de corte”. 2005. 214 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RAMAN, Singh R. K. et al. “Development of spiral notch torsion test: a new fracture mechanics approach to determination of KISCC”. Environment-Induced Cracking of metal, Volume 2, Elsevier, 2008.

RODRIGUES, Guilherme B. “Avaliação da tenacidade à fratura: método Teste de Torção em Entalhe Helicoidal”. 2020. 137 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Sandvik Coromant ©. “EXTERNAL TURNING” - Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/pages/external-turning.aspx>>. Acesso em 10/03/2021.

Sandvik Coromant ©. “GENERAL TURNING” - Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/general-turning/pages/default.aspx>>. Acesso em 10/03/2021.

SCHNEIDER, Eric. “Turn down the volume”. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/memagazineselect/article/132/04/36/380081/Turn-Down-the-Volume-What-Design-options-do-you>>. Publicado em 01/04/2010. Acesso em: 21/06/2021

TEIXEIRA, Ana Paula P. et al. "Controle de custos: ferramenta para gestão das Micro e Pequenas Empresas". XV Congresso Brasileiro de custos, Curitiba - PR, novembro de 2008.

WANG, J. Y-An; LIU, Kenneth C. "Fracture Toughness Determination Using Spiral-Grooved Cylindrical Specimen and Pure Torsional Loading". US006588283B2. 08/07/2003. United States, p. 24.

WANG, J. Y-An; LIU, Kenneth C. "A New Approach to Evaluate Fracture Toughness of Structural Materials". ASME, J. Pressure Vessel Technol. Vol 126, 2004, p.534-540.