

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE DESGASTE EM
INSTRUMENTO CIRÚRGICO PARA ALOJAMENTO DA HASTE FEMORAL DA
PRÓTESE FEMORAL

Altamir Inácio dos Santos

Dissertação para Obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2018

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGE3M

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE DESGASTE EM
INSTRUMENTO CIRÚRGICO PARA ALOJAMENTO DA HASTE FEMORAL DA
PRÓTESE FEMORAL

ALTAMIR INÁCIO DOS SANTOS
Tecnólogo em Fabricação Mecânica

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS,
dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
– PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2018

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alex Fabiano Bueno, IFSUL

Prof. Dr. Eduardo Luis Scheneider, UFRGS

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros, FURG

Prof. Dr. Carlos P. Bergmann
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Inicialmente ao Professor Dr. Telmo Roberto Strohaecker, por quem tenho grande admiração, e que com sua visão empreendedora despertou o potencial de todos ao seu redor.

Ao meu orientador Professor Dr. Afonso Reguly, pelos ensinamentos, por seu exemplo de ética e cidadania, sua capacidade de agregar pessoas interessadas na busca de conhecimentos, por acreditar e valorizar a profissão da engenharia e sobretudo sua paciência em todos os momentos.

Ao pessoal do Laboratório LAMEF

Aos meus colegas do IFSUL Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Riograndense - Campus Charqueadas.

Ao MSc. Engº. Metalúrgico Bill Paiva dos Santos, filho e colega de Mestrado pelos auxílios, orientações e muitas cobranças, teve importante participação, do projeto à fabricação da máquina de ensaios.

À Navy Tools Ind e Com de Brochas Ltda pela doação da ferramenta para a avaliação do desgaste e do comportamento da máquina.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.

Em especial a minha esposa Marilene e aos filhos Bill e Bruno, pela paciência e compreensão nos momentos de ausência, os quais não canso de dizer que os amo, e que sempre estarão em primeiro lugar em minha vida.

Dedico esta dissertação à meus pais Oscar e Olivia (*in memoriam*)

Agradeço...

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS	III
LISTA DE EQUAÇÕES	IV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	V
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 ESTUDO DE ADEQUAÇÃO DE MÁQUINAS	2
2.1.1 Lay-out da estrutura	2
2.1.2 Considerações quanto a Rigidez Estática e Dinâmica de Máquinas- Ferramentas	3
2.2 A MÁQUINA “PLAINA LIMADORA”	4
2.2.1 Movimentos	5
2.3 MATERIAIS DE FERRAMENTA	5
2.3.1 Aço Rápido	7
2.4 BIOMATERIAIS	9
2.4.1 Titânio e suas ligas.....	10
2.5 CERÂMICA	11
2.5.1 Cerâmica refratária.....	12
2.5.2 Propriedades dos materiais cerâmicos refratários	14
2.5.2.1 <i>Propriedades físicas</i>	14
2.5.2.2 <i>Propriedades mecânicas</i>	15
2.5.2.3 <i>Propriedades térmicas</i>	16
2.6 TRIBOLOGIA.....	18
2.6.1 Princípios básicos de tribologia	18
2.7 DESGASTE.....	20
2.7.1 Processo de Corte na Usinagem	20

2.7.2	Mecanismos de Desgastes da Ferramentas	22
2.7.3	Desgaste Abrasivo	23
2.7.4	Desgaste por Aderência e Arraste	23
2.7.5	Desgaste por Deformação Plástica	25
2.7.6	Desgaste Difusivo	26
2.7.7	Fadiga e Fratura	27
2.7.8	Tipos de Desgastes em Ferramentas “Brochas”	27
2.8	ARTROPLASTIA DE QUADRIL	28
2.9	A PRÓTESE	30
2.10	FERRAMENTAS PARA ASSENTAMENTO DE PRÓTESES DE QUADRIL 32	
2.10.1	Fresas	32
2.10.2	Instrumentos Raspadores Femorais	33
2.10.3	Raspador Teste e a Cabeça de Teste	34
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.1	MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	35
3.2	PROJETO E ADEQUAÇÃO DA MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE 37	
3.3	MOVIMENTOS DURANTE O ENSAIO	43
3.4	ESTABILIDADE DA MÁQUINA	45
3.5	FERRAMENTAS DE DESGASTE	45
3.6	FERRAMENTAS UTILIZADAS	46
3.7	SUPORTE DE FIXAÇÃO	47
3.8	CÉLULA DE CARGA	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	VALIDAÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIO	51
4.1.1	Definição dos parâmetros de corte	51
4.1.2	Definição dos resultados	52
4.1.3	Influência do atrito no flanco secundário	57
5	CONCLUSÕES	59
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	60
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1- Melhoramento estrutural e redução de peso com adição de nervuras internas.</i>	4
<i>Figura 2 – Plaina limadora.</i>	4
<i>Figura 3 - Cronologia dos materiais para ferramentas.</i>	5
<i>Figura 4 - Composição e características dos aços rápidos.</i>	8
<i>Figura 5 a) Próteses femurais de Titânio e cerâmica; b) Stents para cirurgias vasculares; c) Grampos de JUDET para cirurgias de fraturas em costelas.</i>	9
<i>Figura 6 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.</i>	18
<i>Figura 7 - Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces.</i>	19
<i>Figura 8 - Distribuição de temperatura na ponta de uma ferramenta de HSS.</i>	21
<i>Figura 9 - Força de corte x velocidade de corte e avanço.</i>	21
<i>Figura 10 - Mecanismos de desgastes em ferramentas de corte de aço rápido.</i>	22
<i>Figura 11 - Desgaste abrasivo.</i>	23
<i>Figura 12 - Desgaste por abrasão e por aderência em uma ferramenta de fresamento de aço rápido.</i>	24
<i>Figura 13 - Deformação plástica em uma ferramenta de aço rápido.</i>	25
<i>Figura 14 - Secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido após usinar um aço inoxidável austenítico.</i>	26
<i>Figura 15 - Lascamento da aresta de corte em uma fresa caracol.</i>	27
<i>Figura 16 - Dente com lascamento devido acúmulo de cavaco (falta de limpeza).</i>	28
<i>Figura 17 - Prótese de quadril.</i>	30
<i>Figura 18 - Prótese total de quadril não cimentada.</i>	30
<i>Figura 19 - Etapas de uma cirurgia.</i>	31
<i>Figura 20 - Fresa reta.</i>	32
<i>Figura 21 - 1ª Fresa reta. (esquerda), a 2ª Fresa reta, totalmente introduzida (direita).</i>	32
<i>Figura 22 - Raspa femoral em conjunto com cabo.</i>	33
<i>Figura 23 - Raspador femoral e o cabo em detalhe.</i>	33
<i>Figura 24 - Raspador teste e cabeça de teste.</i>	34
<i>Figura 25 - Preparação adequada do canal femoral (esquerda) e Posicionamento definitivo (direita).</i>	34
<i>Figura 26 - Organograma das principais etapas realizadas na validação da máquina de ensaios para avaliação de desgaste em instrumento cirúrgico (Raspa femoral) usado para alojamento de próteses totais de articulação de quadril.</i>	36
<i>Figura 27 - Equipamento adquirido junto à empresa, Metalúrgica Gaúcha.</i>	38
<i>Figura 28 - Engrenagens e acoplamento.</i>	38

<i>Figura 29 - Imagem esquemática do Sistema de mudança de velocidade de movimento (caixa de velocidades).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 30 - Imagem esquemática do volante Sistema de mudança de velocidade.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 31 - Imagem esquemática do Sistema de alteração do movimento de rotação para movimento retilíneo alternado (vista em corte).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 32 - Imagem do sistema de fixação da peça a ser desgastada sobre a mesa de trabalho.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 33 - Descrição das partes da máquina.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34 - Vista geral da máquina de ensaios de desgaste em RF projetada. Destacam-se os dois postos de trabalho e os eixos de acionamento principal e secundário.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 35 - Sentidos de movimentos da mesa.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 36 - Sistema do movimento nos dois sentidos do eixo X.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 37 - Regulagem do comprimento do curso do instrumento cortante (vista em corte).</i>	<i>44</i>
<i>Figura 38 - Anel graduado com divisão de 0,1mm.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 39 - Brocha.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 40 - Detalhe da ferramenta e das dimensões dos dentes.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 41 - Suporte com a ferramenta montada.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 42 - Desenho dimensionado das peças do suporte.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 43 - Suporte e a fixação da ferramenta.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 44 - a) mostra a célula de carga; b) mostra o local da célula de carga e a ferramenta atuando sobre o material.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 45 - Ferramentas desgastadas.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 46 - (a) escaneamento com a ferramenta na posição horizontal, (b) escaneamento com a ferramenta na posição inclinada à 60°.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 47 - Usinagem para definição dos parâmetros.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 48 - Ferramenta 1- Imagens quantitativa e qualitativa da perda de massa.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 49 - Ferramenta 2- Imagens quantitativa e qualitativa da perda de massa.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 50 - Imagem da ferramenta antes do desgaste.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 51 - Imagem (a) desgaste na primeira etapa do ensaio; Imagem (b) desgaste na segunda etapa do ensaio.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 52 - Gráfico das perdas de massa.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 53 - Imagem gráfica do comportamento da máquina.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 54 - Imagem do mecanismo de ciclo da ferramenta.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 55 - Gráfico comparativo de carga das duas Ferramentas.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 56 - Sentido da profundidade de corte e de avanço de corte da peça.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 57 - Seção da ferramenta desgastada.....</i>	<i>58</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Classificação de materiais refratários conforme a NBR 10237.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2 - Classificação dos materiais refratários segundo a composição química.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3 - Características de desgastes de brochas e ações para evitar ou minimizar o problema.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4 - Etapas dos ensaios.....</i>	<i>55</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 1. Rigidez Dinâmica.....</i>	<i>3</i>
<i>Equação 2. Avanço da Mesa por Volta.....</i>	<i>41</i>
<i>Equação 3. Golpes por Minuto.</i>	<i>42</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A - avanço da mesa

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACN - Acetonitrila

AISI – América Iron and Steel Institute

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APC – aresta postiça de corte

ASTM – International, originalmente conhecida como American Society for Testing and Materials

ATQ - artroplastia total de quadril

CVD – Deposição Química por Vapor

DIN – Deutsches Institut für Normung

DLC - Diamond-like carbon

DMF - Dimetilformamida

Fa - força de atrito

F_n - força normal

FR - fresa reta

GPM - golpes por minuto

Hz - Hertz

IFSUL - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul Riograndense

ISO – International Organization for Standardization

K – Fator de Desgaste

N - número de dentes da engrenagem

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

M – Molibdênio

mm³/mc – milímetro cúbico por milhão de ciclos

P - passo do parafuso de comando da mesa

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PEUAPM - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular

POM – polyoxymethylene

PVD - Deposição Física por Vapor

PTAQ - Prótese total de articulação de quadril

RF - Instrumento Cirúrgico Raspa Femoral

RPM – Rotação por Minuto

T - Tungstênio

TT - cabeça de teste

UFRGS/CADETEC – Casa de Desenvolvimento Tecnológico da UFRGS

UFRGS/LDSM – Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS

Z – Número de dentes

μ - coeficiente de atrito “adimensional”

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o projeto de adequação de um equipamento para que possa avaliar o desgaste em instrumento responsável pelo alojamento da prótese de fêmur (chamada de Raspa femoral). Em um primeiro momento, uma plaina limadora foi adquirida, a qual foi desmontada e, sendo avaliado cada componente, feito modificações e substituição de peças danificadas. Para a validação da máquina e comprovação do desgaste foi utilizada uma ferramenta de aço rápido AISI M2 sem revestimento, (conhecida como Brocha). Assim, para realização do desgaste da ferramenta, foram considerados como parâmetros de ensaio a velocidade de corte, profundidade de corte, avanço de corte, a camada removida e os golpes por minuto (GPM). Na prática, avaliações de folgas e deterioração dos elementos em movimentos foram realizadas e apresentaram resultados satisfatórios. Além disso, ciclos de usinagem em um bloco de alumínio foram realizados para observação do comportamento da máquina. No ensaio de desgaste foi utilizado um bloco refratário para provocar a degradação da ferramenta. Para isso, foi necessário a realização de um pré teste para definição dos parâmetros de corte. As variáveis utilizadas para os ensaios foram 40 GPM e o avanço de corte de 0,10 mm/golpe. O equipamento produzido apresentou reprodutibilidade dos ensaios, no que diz respeito as avaliações da perda do poder de corte da ferramenta, além disso, notou-se estabilidade durante os ensaios e um custo relativamente baixo do equipamento.

Palavras chave: Projeto de Equipamento, Raspa femoral, avaliação do desgaste.

ABSTRACT

This study aims to design an equipment to evaluate wear on femoral prosthesis device (called the femoral scrape). At first, a used planer machine was obtained, each component evaluated and all the necessary modifications and replacement of damaged parts were performed. For the machine validation an Broach made of AISI M2 tool steel was used. The cutting speed, cutting depth, shear advance, layer removed and strokes per minute were considered as tool wear test parameters. In practice, evaluations of clearances and deterioration of moving parts were performed and they presented satisfactory results. In addition, machining cycles in an aluminum block were performed to observe the machine behavior. In the wear test, a refractory block was used to evaluate tool degradation due to the abrasion. For this, it was necessary to perform a pre-test to define the cutting parameters. The variables used for the tests were 40 strokes per minute with cut advance 0.10mm/stroke. The equipment showed good test reproducibility to evaluations of tool cutting power, a relatively low production cost, and stability was also observed.

Key words: Equipment design, Femoral scrape, wear evaluation.

1 INTRODUÇÃO

O desgaste pode ser definido como a perda progressiva de massa da superfície de um corpo, devido ao movimento relativo deste com outro (YAMAGUCHI, 1990; REIS & ZAVAGLIA, 1999; JAFARIA, DEHGHANI, BAHAAADDINI, & HATAIE, 2018). De fato, o desgaste está relacionado com as interações entre superfícies, com isto há remoção ou deformação do material como resultado da ação mecânica. Este processo ocorre devido ao contato entre metais, sólidos não metálicos, líquidos ou partículas sólidas. Nos ensaios mecânicos, geralmente utilizados para caracterização dos materiais, o desgaste pode ser observado nos instrumentos por medição qualitativa e quantitativas. Desta maneira, a ocorrência do desgaste pode ser um fator determinante na vida útil destes componentes. Esta perda de material ocasiona o desgaste da aresta cortante e prejudica a funcionalidade do componente ou da ferramenta e, conseqüentemente, do dispositivo no qual está inserido.

Sendo assim, é um fenômeno variável de difícil representação quantitativa no dimensionamento de componentes. Portanto dificilmente equacionável de maneira precisa. De acordo com as condições existentes na utilização do componente pode-se ter uma idéia qualitativa de qual o mecanismo de desgaste vai ocorrer predominantemente. No entanto, existem diversas situações que dificultam na previsão do comportamento de componentes em relação ao desgaste por causa da complexidade do sistema tribológico que o compõe (REIS & ZAVAGLIA, 1999; JUEUN LEE, 2018).

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um equipamento para ensaio de desgaste em instrumento cirúrgico para alojamento da haste femoral da prótese femoral e como objetivo específico, o projeto e a modificação da máquina, o ensaio e a validação do equipamento. Além dos custos gerados com a ocorrência do desgaste dos instrumentos para alojamento das próteses. O próprio bem estar do paciente pode ser afetado pela duração na mesa de cirurgia causando-lhe sofrimento pela utilização de instrumentos não qualificados e inadequados que não são capazes de cumprir os requisitos básicos de funcionamento. O estudo dos mecanismos de desgaste em um sistema tribológico é fundamental para a seleção de materiais e também para a previsão da durabilidade do sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTUDO DE ADEQUAÇÃO DE MÁQUINAS

A tecnologia avança a passos largos, máquinas e equipamentos cada vez mais sofisticados são lançados praticamente quase que todos os dias. Mas o que fazer com equipamentos ultrapassados e/ou fora de linha? Quem sabe enviar para uma siderurgica ou até mesmo para um museu! Muitas empresas buscam soluções viáveis a baixo custo para adequar tais equipamentos, o chamado *retrofitting* (reforma, modernização), esse sistema se apresenta vantajoso, por propiciar ao empresário a melhoria dos processos e ainda evitar a perda com passivo fabril.

O *retrofitting* deve atender necessidades específicas como produtividade, qualidade e segurança. Para tal, são considerados itens como movimentos realizados pela máquina; a estrutura do equipamento, a estrutura é dividida em parte fixa e móvel (STOETERAU, 2004).

2.1.1 Lay-out da estrutura

O Lay-out da estrutura é determinado pelas seguintes considerações:

- ✓ Condições operacionais – Determinada pelos movimentos relativos de peça e ferramentas, considerando-os separadamente ou em conjunto;
- ✓ Capacidade de forma – Determinada pela área útil ocupada pelo equipamento mais os espaços necessários para a movimentação relativa entre peça e ferramenta;
- ✓ Requisitos de desempenho – Considera além da capacidade mínima e máxima de usinagem (dimensões da peça), a taxa de remoção de material e critérios de qualidade como acabamento e exatidão;
- ✓ Eficiência técnica e econômica – Determinada desde a concepção do projeto do equipamento, prevendo fabricação dos componentes; montagem; transporte (logística de instalação); instalação; métodos de operação do

equipamento; ferramentais a serem utilizados, adaptados e/ou instalados em segundo plano; itens de segurança tanto para transporte do equipamento quanto para operações de produção e set-up; normas vigentes a serem seguidas como NR10 e NR12, por exemplo; potência do equipamento e consumo energético; reposição de peças e componentes nacionais; manutenção facilitada para peças e componentes; troca rápida de ferramentas, entre outros (STOETERAU, 2004).

2.1.2 Considerações quanto a Rigidez Estática e Dinâmica de Máquinas-Ferramentas

A literatura apresenta que a rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-peça, influencia significativamente na formação de peças usinadas principalmente em peças de revolução. A rigidez dinâmica interfere, de certa forma, na produtividade, muito devido a erros de planeza e cilindricidade, ocasionados por pequenas deformações do sistema já referido. (MATSUMOTO & SILVA, 2007) (R.M. KHUSAINOV, 2017)

Para efeito de projetos estruturais, como parâmetro, se utiliza a rigidez dinâmica devido a relação entre carga e deformação em função da frequência (Equação 1).

Equação 1. Rigidez Dinâmica.

(1) Rigidez Dinâmica estabelecida entre a relação da carga e deformação em função da

frequência

$$k(\omega) = \frac{F(\omega)}{\sigma_n(\omega)}$$

onde:

k = rigidez;

F = força aplicada ou carregamento;

σ_n = deslocamento;

ω = frequência.

Os cálculos para o problema de rigidez dinâmica, de certa forma, apresentam de forma resumida a deformação efetiva do conjunto máquina ferramenta quando sujeita e ou submetida a vibrações sob a ação de forças inerciais, e carregamentos dinâmicos.

Para uma melhora na rigidez dinâmica, quando de retrofiting, é utilizado a colocação de nervuras transversais externas, quando possível (Figura 1). Esta aplicação possibilita,

também, a redução de material de paredes, reduzindo assim o peso do equipamento (MOHIT LAW, 2013).

Figura 1- Melhoramento estrutural e redução de peso com adição de nervuras internas.



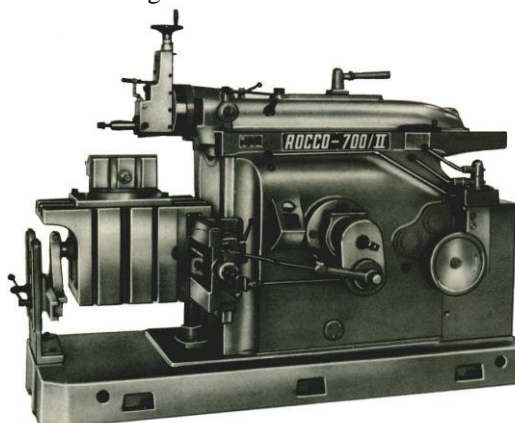
Fonte: Obtido de MOHIT LAW, 2013.

2.2 A MÁQUINA “PLAINA LIMADORA”

Destinada a realização de operações de aplainamento, rasgos, estrias, rebaixos e chanfros, a plaina limadora (Figura 2) realiza tais operações com o deslocamento retilíneo alternativo da ferramenta sobre a superfície da peça a ser usinada.

Com o advento das tecnologias e a constante evolução dos processos de fabricação, a plaina limadora caiu em desuso no meio fabril, sendo hoje, considerada item descontinuado e/ou obsoleto.

Figura 2 – Plaina limadora.



Fonte: Obtido de FERRARESI, 1987.

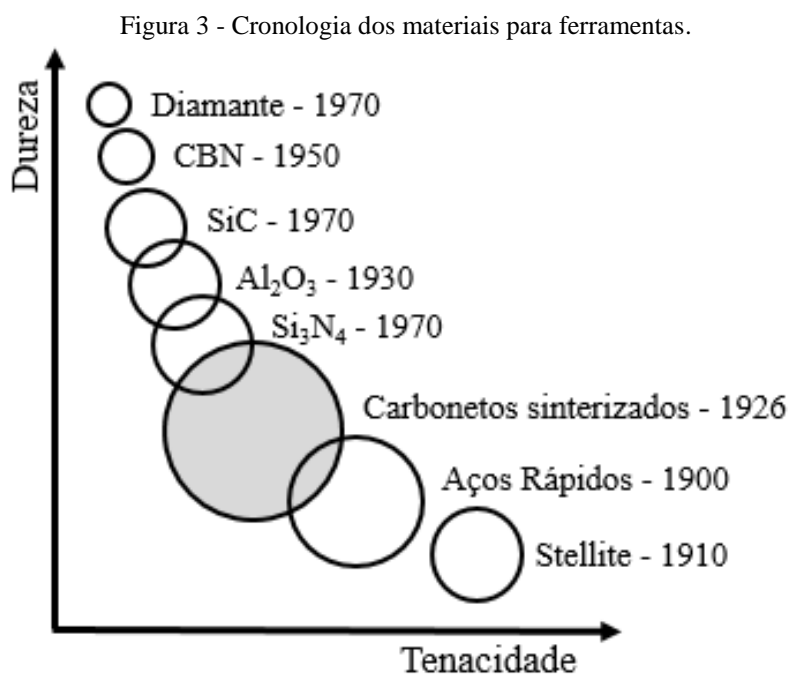
2.2.1 Movimentos

Similar a outras máquinas operatrizes como por exemplo, as Fresadora vertical e mandriladoras, a planina limadora apresenta três movimentos distintos durante as operações, que são:

- ✓ Movimento principal – Este é executado pela ferramenta e se subdivide em curso útil (onde se dá a remoção de material) e curso em vazio (retorno da ferramenta para o ponto de origem);
- ✓ Movimento de avanço – Realizado pela mesa de fixação da peça, este é perpendicular ao movimento principal;
- ✓ Movimento de ajuste - é um movimento vertical feito pela ferramenta ou pela mesa neste movimento o operador regula a espessura do material (cavaco) a ser removido (FERRARESI, 1987).

2.3 MATERIAIS DE FERRAMENTA

Cronologicamente, os principais materiais utilizados para ferramenta em usinagem se desenvolveram de acordo com a Figura 3. De forma geral, a medida que se aumenta a dureza, se obtém uma redução na tenacidade dos materiais. (GUIMARÃES, 2009).



Fonte: Adaptado de (GUIMARÃES, 2009).

A seleção do material para uma ferramenta deve ser feita de forma criteriosa, analisando muito bem o processo como um todo e, para que isso ocorra, se deve responder alguns questionamentos para a escolha mais adequada do aço ferramenta a ser utilizado. (BRYSON, 2015). Tais questionamentos são:

✓ **Temperatura do Processo:** A que temperatura o aço ferramenta estará submetido? Trabalho a quente ou a frio? As operações a quente requerem cuidados especiais para evitar desgaste prematuro da ferramenta.

✓ **Tipo de operação:** Qual operação será executada pelo aço ferramenta? Corte, dobra, usinagem (furação, torneamento, brochamento, fresagem), estampagem, forjamento?

✓ **Quantidade de produção:** Qual a quantidade de peças a serem produzidas? Será intermitente ou ciclo contínuo?

✓ **Qualidade do material:** Qual a qualidade superficial do material a ser trabalhado? A superfície é bruta de forja, abrasiva, laminada, polida ou acabamento de usinagem?

✓ **Massa a ser trabalhada:** Qual a espessura do material a ser trabalhado pela ferramenta? Haverá impacto ou não?

✓ **Dureza:** Qual a dureza do material e/ou materiais a serem trabalhados pela ferramenta? Durante as operações esta dureza tende a aumentar?

✓ **Tipo de peça:** Que tipo de peça/componente será produzido? A produção será limitada? Será um protótipo/amostra e a qualidade da ferramenta não importará neste momento?

✓ **Dureza à quente:** As peças fabricadas servirão como ferramentas de corte para outros materiais? Se sim, utilizar material que tenha uma maior dureza a quente, para evitar desgastes excessivos durante o processo.

✓ **Composição química:** Qual a composição química do material ou materiais a serem trabalhados pela ferramenta? Apresenta altos teores de cromo? Se sim, cuidar muito na escolha do material da ferramenta para evitar lascamentos durante o processo e possível desgaste prematuro do ferramental.

✓ **Tenacidade:** No processo a ser executado haverá compressão? Muitas vezes a compressão é vista como impacto, quando na verdade não é.

✓ **Estabilidade química:** Propriedade importante para evitar desgastes do gume por difusão atômica, com ocorrências em elevadas velocidades de corte o que provoca altas temperatura. (BRYSON, 2015).

Nos primórdios da história do brochamento; se fabricavam as ferramentas com aços temperáveis em água, devido a ser o único material que atendia as necessidades de operação, levando em conta o maquinário e esforços envolvidos à época. As velocidades de corte eram baixas, geralmente acionadas por meio de fusos. (MONMA, 2014) apud (GONÇALVES, 2009).

Dentro da indústria; devido a necessidade de elevar a produção, houve uma demanda por equipamentos que apresentassem elevadas velocidade de corte, o que limitou o uso de aços ferramentas, muito devido à maior temperatura gerada no processo. Com o aumento da temperatura a ferramenta enfraquece e conseqüentemente fica sujeita a maiores desgastes e avarias. A evolução tecnológica dos processos de usinagem e conseqüentemente do brochamento, culminou em uma predominância de aços-rápidos para fabricação de brochas (ASM., 1989).

2.3.1 Aço Rápido

A revolução industrial teve um grande e fundamental papel para o surgimento de novos materiais, entre eles o aço rápido. Se difundiu rapidamente na indústria metalmeccânica por suportar altas velocidades (altas para época). A performance deste aço-ferramenta de alta liga é devido a sua composição que agrega tungstênio, molibdênio, cromo, vanádio, cobalto e nióbio. Sua estrutura metalográfica temperado, apresenta martensita básica com incrustação de carbonetos.

O aço rápido apresenta ainda elevadas tenacidades, resistência ao desgaste e dureza a quente, se comparado com o aço-ferramenta. Essa dureza a quente se deve à estrutura martensítica. O grau de dissolubilidade dos elementos de liga determina a tenacidade do material. Ao passo que a resistência à abrasão é devido da quantidade de carbonetos duros formados em sua estrutura (DINIZ, 2006).

Os aços ferramentas, de um modo geral, são classificados por letras. Estas letras determinam o material e são seguidas de um ou dois números. Se pode destacar os seguintes aços conforme suas letras:

- ✓ W: aços temperáveis em água;
- ✓ O: aços temperáveis em óleo;
- ✓ A: aços temperáveis ao ar;
- ✓ S: aços resistentes ao impacto;
- ✓ T: aço rápido ao W;
- ✓ M: aço rápido ao Mo;
- ✓ H: aço indeformável para trabalho a quente;
- ✓ D: aço indeformável para trabalho a frio;
- ✓ L: aço para uso especial em baixa-liga;
- ✓ F: aço para uso especial contendo C e W.

Os aços rápido, dos tipos T e M, apresentam composição química conforme exposto na Figura 4, para as diferentes classes.

Figura 4 - Composição e características dos aços rápidos.

Tipo de aço	Clas. SAE	C[%]	Mn[%]	Si[%]	Cr[%]	V[%]	W[%]	Mo[%]	Co[%]
Ao W	T1	0,70	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	-
	T2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	-
	T3	1,00	0,30	0,25	4,00	3,00	18,00	-	-
	T7	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	-
	T9	1,20	0,30	0,258	4,00	4,00	18,00	-	-
Ao W-Co	T4	0,75	0,30	0,25	4,00	1,00	18,00	-	5,00
	T5	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	18,00	-	8,00
	T6	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	20,00	-	12,00
	T8	0,80	0,30	0,25	4,00	2,00	14,00	-	5,00
Ao Mo	M1	0,80	0,30	0,25	4,00	1,00	1,50	8,00	-
	M2	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	-
	M3	1,00	0,30	0,25	4,00	2,75	6,00	5,00	-
	M4	1,30	0,30	0,25	4,00	4,00	5,50	4,50	-
	M10	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	-	8,00	-
Ao Mo-Co	M4	0,80	0,30	0,25	4,00	1,50	4,00	5,00	12,00
	M30	0,85	0,30	0,20	4,00	1,25	2,00	8,00	5,00
	M34	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	2,00	8,00	8,00
	M35	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	5,00
	M36	0,85	0,30	0,25	4,00	2,00	6,00	5,00	8,00

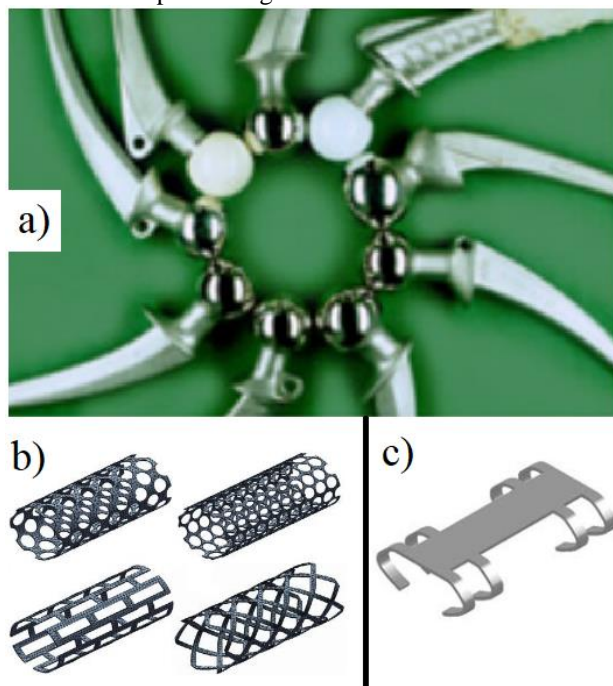
Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (2005).

2.4 BIOMATERIAIS

Biomateriais são materiais naturais e/ou artificiais projetados para atuarem de forma parcial ou total em nossos sistemas (tecidos, órgãos), tendo por finalidade de substituir, aumentá-los ou tratá-los (FRANZ, 2011).

Utilizados para propiciar uma melhor condição de vida, por exemplo, em patologias ósseas, reparação de traumatismos, estética bucal, entre outros. Também contribuem no auxílio para prolongamento de vida em casos como desobstrução de artérias (uso de *stents*), cirurgias cardiovasculares de modo geral e fraturas de costelas, onde neste último, se utiliza biomateriais com memória de forma para fabricação de grampos de jude. A Figura 5 apresenta a imagem de alguns componentes produzidos por Biomateriais. (V. MARTINS P. R., 2012); (HOLZAPFEL, 2013).

Figura 5 a) Próteses femurais de Titânio e cerâmica; b) Stents para cirurgias vasculares; c) Grampos de JUDET para cirurgias de fraturas em costelas.



Fonte: Adaptado de: (V. MARTINS W. C., 2010) (V. MARTINS P. R., 2012); (HOLZAPFEL, 2013).

O uso de biomateriais na medicina, deve ser realizado após análise adequada do mesmo, pois este deverá apresentar biocompatibilidade, resistência mecânica adequada à aplicação, no caso de implantes e, principalmente, excelente resistência a corrosão de componentes utilizados para implantes, a fim de evitar corrosão e possível contaminação da região onde for utilizado (PARK, J. B.; BRONZINO, J. D., 2002); (GEETHA, 2009).

2.4.1 Titânio e suas ligas

Entre as muitas utilizações do titânio se encontra a aplicação, em larga escala, na indústria médica, sendo empregado por ortopedistas no tratamento do sistema músculo esquelético. O emprego do titânio na área médica data da década de 1950, hoje é o material preferido para fabricação de órteses e próteses devido as suas propriedades, tais como, biocompatibilidade, elevada resistência mecânica e a corrosão, além de baixo peso específico. (FROES F. (., 2018)

O titânio foi descoberto em 1790, pelo Inglês William Gregor (1761-1817). A origem do seu nome faz referência aos titãs, os primeiros filhos da Terra, segundo a mitologia grega o titânio é o nono elemento mais abundante na Terra. A combinação da elevada resistência-peso, excelentes propriedades mecânicas e resistência à corrosão, fazem deste elemento uma das melhores escolhas para as indústrias química, aeroespacial, de energia e biomédica (DONACHIE, 2000).

O titânio puro apresenta teores de pureza em torno de 98 a 99,5%, sendo que suas propriedades físicas podem variar de acordo com a quantidade de impurezas. Certas quantidades de oxigênio (O), ferro (Fe), nitrogênio (N), carbono (C) e hidrogênio (H) presentes no “titânio puro” podem provocar algumas mudanças em suas propriedades mecânicas. Principalmente o oxigênio e o ferro ocupam interstícios no arranjo cristalino e causam desalojamento parcial dos átomos de titânio. Isto acarreta em um “travamento” que diminui o eventual deslizamento dos átomos quando sujeitos a forças externas, proporcionando um aumento da resistência mecânica do material (BAUER, 2007).

Aos 882° C, o titânio sofre uma transformação alotrópica, passando de uma estrutura hexagonal compacta α (estável a baixa temperatura) para uma estrutura cúbica de corpo centrado β . A adição de alumínio (Al) e vanádio (V) ao titânio puro provoca uma diminuição na temperatura de transição $\alpha=\beta$ como ocorre na liga Ti6Al4V, bastante utilizada em implantes sujeitos a esforços tais como juntas de quadril e joelho (PARK, J. B.; BRONZINO, J. D., 2002).

O titânio e suas ligas são excelentes materiais para aplicação biomédica, todavia, apresentam algumas limitações em relação às propriedades tribológicas, entre elas a baixa resistência ao desgaste comparado com as ligas de cobalto-cromo e aço inoxidável. Esta limitação do titânio e suas ligas pode ser contornada utilizando-se tecnologias de

melhoramento superficial, como por exemplo a nitretação ou recobrimento. Inúmeros trabalhos têm sido realizados para melhorar o desempenho do titânio e suas ligas (REISSIG, 2004). Muitos trabalhos citam os revestimentos de carbono amorfo, os quais possuem elevada dureza, resistência ao desgaste e a resistência à corrosão.

2.5 CERÂMICA

A palavra “cerâmica” é derivada do vocábulo grego *keramos*, que significa “argila queimada”. É um dos materiais artificiais mais antigos produzidos pelo homem, utilizado inicialmente na confecção de vasilhas que deveriam ser resistentes, impermeáveis e de fácil fabricação.

A primeira grande fábrica de produtos cerâmicos no Brasil foi fundada em 1893 na cidade de São Paulo, por quatro irmãos franceses, naturais de Marselha, dando origem às telhas com nome “francesas” ou “marselhesas” (SEBRAE, 2008).

Segundo Callister (2008), cerâmicas são compostos formados por elementos metálicos e não metálicos, frequentemente compostos por óxidos, nítretos e carbetos (materiais inorgânicos). Esses materiais têm, como características, isolamento térmico e elétrico elevado, resistência elevada a ataques químicos e altas temperaturas. Em relação às propriedades mecânicas, as cerâmicas são duras, frágeis e quebradiças (CALLISTER, 2008).

A argila, um material natural, é a principal matéria-prima utilizada nas cerâmicas. Possui textura terrosa, granulação fina, e é constituída basicamente de argilominerais, além de matéria orgânica e outras impurezas. Os argilos minerais presentes fazem com que a mesma, na presença de água, desenvolva propriedades como: plasticidade, retração linear de secagem, compactação, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas que explicam sua grande variedade de aplicações. Os principais grupos de argilominerais são caulinita, illita e esmectitas ou montmorilonita (ABCERAM., 2016).

As caulinitas são as mais refratárias, pois a presença de óxidos e hidróxidos de ferro é quase nula, sendo assim brancas ou quase brancas, ao contrário das montmorilonitas. Este último grupo exibe uma plasticidade maior em função das partículas serem mais finas. As illitas apresentam características intermediárias (NJOYA, 2012).

2.5.1 Cerâmica refratária

Materiais refratários são produtos que possuem a finalidade de suportar temperaturas elevadas nas condições específicas de processo e operação dos equipamentos industriais, que envolvem ataques químicos, esforços mecânicos e variações bruscas de temperaturas.

A capacidade de proporcionar isolamento térmico é importante, sendo suas principais aplicações em revestimentos de fornos para refino de metais, fabricação de vidro, tratamentos térmicos e geração de energia (BÓ, 2007).

A NBR 10237 (ABNT, 2014) classifica as cerâmicas em três grupos de acordo com a composição química e mineralógica da matéria-prima predominante na mistura: ácidos, básicos e neutros, e os que não se enquadram satisfatoriamente em nenhum dos três grupos mencionados, são chamados refratários especiais, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação de materiais refratários conforme a NBR 10237.

Grupo	Classe
Ácidos	Sílicos ou de sílica
	Silicoalumínicos ou de sílica-alumina
Básicos	Magnesianos ou de magnésia
	Magnésio-cromíticos ou de magnésia-cromita
	Cromomagnesianos ou de cromita-magnésia
	Dolomíticos ou de dolomita
	De magnésia-carbono
Neutros	Alumínicos ou de alumina
	De alumina-carbono
	De alumina-carbeto-carbono ou silício-carbono
	Alumínicos cromíticos ou de alumina-cromita
	Cromíticos ou de cromita
	De carbono
Especiais	Grafiticos ou de grafita
	De carbeto de silício
	De cordierita
	De mulita

Fonte: Adaptado de NBR 10237 (ABNT, 2014, p.3).

Os materiais refratários ácidos são constituídos principalmente por sílica e resistem à temperatura de aproximadamente 1700°C. São resistentes a escórias ricas em sílica,

entretanto possuem baixa resistência a escórias básicas. São utilizados geralmente em tetos de fornos para a fabricação de aço e vidro (SOBROSA, 2014).

Refratários neutros possuem um comportamento neutro em relação à reação química e são produzidos com matérias-primas ricas em óxido de alumínio e cromo (STOCHERO, 2015).

Os refratários especiais são relativamente caros, pois incluem os óxidos de elevada pureza, como a magnesita, alumina, sílica, berlíia, zircônia, mulita, além de outros compostos à base de carbetos. Esses materiais, como o carbetto de silício (SiC), têm aplicabilidade na fabricação de elementos para aquecimento, como os cadinhos (CALLISTER, 2008).

A NBR 10237 (ABNT, 2014) também classifica os refratários segundo a composição química, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos materiais refratários segundo a composição química.

Tipo	Classe/Características				
Silicosos	SL-1 (%SiO ₂) 65-84,99	SL-2 (%SiO ₂) 85-92,99	SL-3 (%SiO ₂) Min. 93	-----	-----
Silicoaluminosos	AS-4 (%AL ₂ O ₃) 22-84,99	AS-3 (%AL ₂ O ₃) 28-33,99	AS-2 (%AL ₂ O ₃) 34-39,99	AS-1 (%AL ₂ O ₃) 40-45,99	-----
Magnesianos	MG-85 (%MgO) 81-85,99	MG-90 (%MgO) 86-90,99	MG-95 (%MgO) 91-95,99	MG-85 (%MgO) Min. 96	-----
Magnésia-cromata	MC-60 (%MgO) 55-64,99	MC-70 (%MgO) 65-74,99	MC-80 (%MgO) 75-80,99	(MgO)	-----
Cromomagnesianos	CM-40 (%MgO) 35-44,99	CM-50 (%MgO) 45-54,99	-----	-----	-----
Dolomíticos	DL-30 (%MgO) 25-34,99	DL-30 (%MgO) 35-44,99	DL-30 (%MgO) Min. 45	-----	-----
Aluminosos	AL-50 (%Al ₂ O ₃) 49-55,99	AL-60 (%Al ₂ O ₃) 56-65,99	AL-70 (%Al ₂ O ₃) 66-75,99	AL-80 (%Al ₂ O ₃) 76-85,99	AL-90 (%Al ₂ O ₃) Min. 86
Cromáticos	CR-30 (%Cr ₂ O ₃) 25-34,99	CR-40 (%Cr ₂ O ₃) 35-44,99	CR-50 (%Cr ₂ O ₃) Min. 45	-----	-----

Fonte: Adaptado NBR 10237 (ABNT, 2014 p. 4-8).

Os refratários de sílica são resistentes à deformação a temperaturas elevadas, permitindo que sejam utilizados em temperaturas próximas à temperatura de fusão.

A demanda por refratários silicoaluminosos é crescente e sua fabricação envolve necessariamente a síntese de mulita.

2.5.2 Propriedades dos materiais cerâmicos refratários

As propriedades dos materiais cerâmicos refratários são abordadas no presente trabalho em três grupos: propriedades físicas, propriedades mecânicas e propriedades térmicas.

2.5.2.1 Propriedades físicas

Densidade de massa aparente

De acordo com a NBR ISO 5017 (ABNT, 2015), densidade de massa é a relação da massa de material seco de um corpo poroso por seu volume de massa (g/cm^3 ou kg/m^3). A densidade do refratário expressa uma medida indireta da capacidade térmica, da resistência à corrosão e da resistência mecânica do refratário (DUARTE, 2005).

Porosidade aparente

É a razão do volume total dos poros abertos em um corpo poroso por seu volume de massa. Poros abertos são aqueles que são preenchidos pelo líquido de imersão nos ensaios, de acordo com a NBR ISO 5017 (ABNT., 2015).

Esta propriedade pode influenciar outras propriedades do material refratário, como a resistência à abrasão e a resistência à compressão (RAAD, 2008).

Pascoal e Pandolfelli (2000) destacam que o aumento da porosidade resulta na diminuição da resistência mecânica, da refratariedade sob carga e da resistência à penetração por escória.

Distribuição Granulométrica

A distribuição de tamanho de partículas finas, realizada por técnicas avançadas baseadas em raios X ou método laser, é muito importante na determinação de várias características, dentre elas densidade, permeabilidade, dispersão de suspensões, e outras (DUARTE, 2005).

Certas propriedades dos refratários advêm do empacotamento das partículas que os constituem, como a resistência mecânica e a porosidade. É possível obter cerâmicas mais densas e com resistência mecânica mais elevada em função do menor volume de vazios obtido com a otimização do empacotamento (SOBROSA, 2014).

2.5.2.2 Propriedades mecânicas

Entre as principais propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos refratários destacam-se: resistência à compressão e à flexão, resistência à abrasão e erosão e tenacidade.

Resistência à compressão e à flexão

Durante o processo de aquecimento na utilização de materiais refratários, é comum o surgimento de tensões trativas ou compressivas, como consequência da dilatação do material.

A resistência mecânica à temperatura ambiente não pode ser usada diretamente para prever o comportamento do refratário, mas fornece uma tendência do grau de formação da ligação ocorrida durante o processo de fabricação. Ela indica ainda a capacidade do material de resistir ao manuseio e ao transporte, e de suportar abrasão e impacto em temperaturas ambientes (DUARTE, 2005).

De acordo com Duarte (2005), as variáveis determinantes na resistência mecânica do material são o tipo de ligação química, a temperatura de sinterização e a porosidade. A resistência à compressão é uma propriedade também relacionada à resistência à abrasão e à resistência ao impacto.

Resistência à abrasão e erosão

A resistência à abrasão e à erosão são as propriedades mecânicas que fazem com que os materiais refratários resistam ao efeito abrasivo de outros materiais, como gases ou materiais duros (SOBROSA, 2014).

Materiais que demonstram maior resistência mecânica são os materiais com maior resistência à abrasão (DUARTE, 2005).

Tenacidade

A tenacidade de um material se refere à sua capacidade de absorver energia até sua fratura (CALLISTER, 2008).

Resistência mecânica e tenacidade à fratura são relacionadas por meio do tamanho dos agregados em refratários, o que mostra a importância das propriedades microestruturais dos agregados refratários na resistência (CALLISTER, 2008).

2.5.2.3 Propriedades térmicas

As propriedades térmicas de maior influência na vida útil de um cerâmico refratário são refratariedade, expansão e retração térmica e resistência ao choque térmico.

Refratariedade

A refratariedade é a habilidade que o material demonstra ao resistir aos efeitos das altas temperaturas sem que atinja seu ponto de fusão (RAAD, 2008).

A refratariedade é relacionada com a composição química do material. Compostos com características refratárias demonstram elevados pontos de fusão (SOBROSA, 2014).

Expansão e retração térmica

No processo de queima, devido à fusão parcial dos componentes menos refratários, inicia-se um processo de formação de fases líquidas no interior do produto. A redução da viscosidade das fases líquidas é provocada devido ao aumento de temperatura, facilitando assim o seu deslocamento para dentro dos espaços vazios entre as partículas que ainda não

se fundiram, acarretando em uma diminuição do volume de poros e na retração da peça (JUNIOR, 2009).

Para Duarte (2005), durante o uso do refratário, pode haver variações em suas dimensões, geralmente pequenas, porém permanentes, através da requeima desses materiais. Ocorrem por vários fatores, como o refratário não ter sido queimado por tempo ou temperatura suficiente.

Resistência ao choque térmico

A resistência ao choque térmico é a propriedade que o material refratário tem de suportar as tensões internas pelo aquecimento e resfriamento. Essas tensões podem resultar no surgimento de fissuras e trincas, interferindo na vida útil da peça. Esta propriedade está relacionada com a condutividade térmica do material. Quanto maior a condutividade térmica, menor a tensão desenvolvida no sistema em função da homogeneidade da distribuição das tensões no sistema (QUINTELA, 2011).

Influência do ciclo de sinterização

A sinterização tem como objetivo consolidar o formato definido pelo processo de conformação. As duas principais variações sofridas pelos corpos durante a queima são a diminuição da porosidade e a retração. As características finais as mais importantes são: as dimensões, a forma, a absorção de água, o tamanho médio e a distribuição do tamanho dos poros, resistência mecânica, expansão térmica e a cor de queima (MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O., 1996).

Fases cristalinas após a sinterização

Materiais sinterizados são influenciados pelas fases vítreas e cristalinas presentes. Entre as fases cristalinas, a mulita é preponderante na definição da resistência mecânica final e tenacidade das peças (BERGMANN, C. P; BRAGANÇA, S. R., 2004).

As propriedades apresentadas pela mulita são: elevada resistência mecânica, baixa condutividade térmica, baixa reatividade química, baixa expansão e excelente resistência a altas temperaturas. É importante em função de apresentar pequena variação de suas propriedades termomecânicas quando submetida a significativas variações de temperatura.

Em materiais cerâmicos a mulita é obtida por sinterização de materiais ricos em silicatos de alumínio (argilas caulínicas, cianita, andalusita e silimanita). Em temperaturas elevadas, a partir da liberação da sílica, que reage com a alumina calcinada, ocorre a formação da mulita (ABCERAM., 2016).

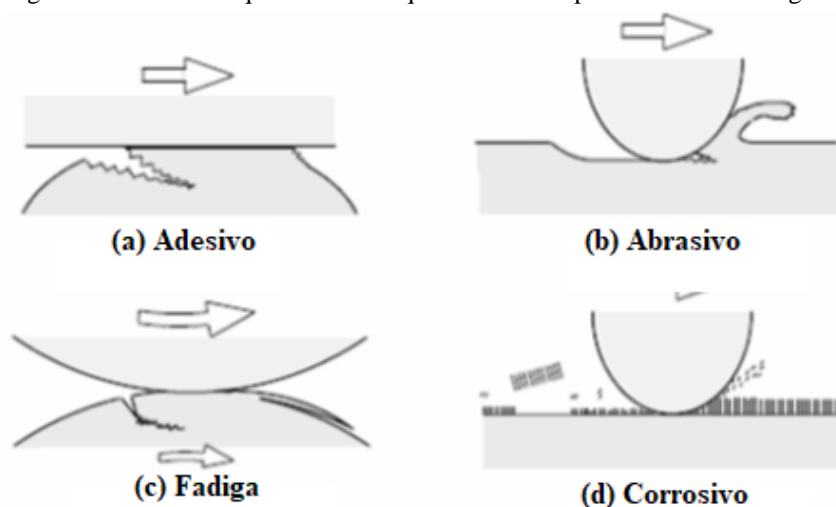
2.6 TRIBOLOGIA

O termo tribologia, que vem do grego Τριβο (Tribo - esfregar) e Λογος (Logos - estudo) foi utilizado, oficialmente, pela primeira vez em 1966 em um relatório feito por H. Peter Jost para o comitê do departamento inglês de educação e ciência. Neste relatório, o termo foi definido como a “ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados” (JOST, 1990). Jost foi o primeiro a estudar os impactos econômicos devido à utilização dos conhecimentos de tribologia. Este estudo é considerado o marco de criação da tribologia (SINATORA, 2005). As estimativas de reduções de gastos apresentadas no relatório de Jost são de que mediante o uso do conhecimento existente podem-se reduzir as perdas por desgaste em 20% (JOST, 1990). O aspecto ambiental também é muito importante na análise global das perdas por desgaste.

2.6.1 Princípios básicos de tribologia

Um dos principais focos de estudo da tribologia é o desgaste. Tradicionalmente são aceitos quatro modos de desgaste que estão representados na Figura 6 (KATO, 2001).

Figura 6 - Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.

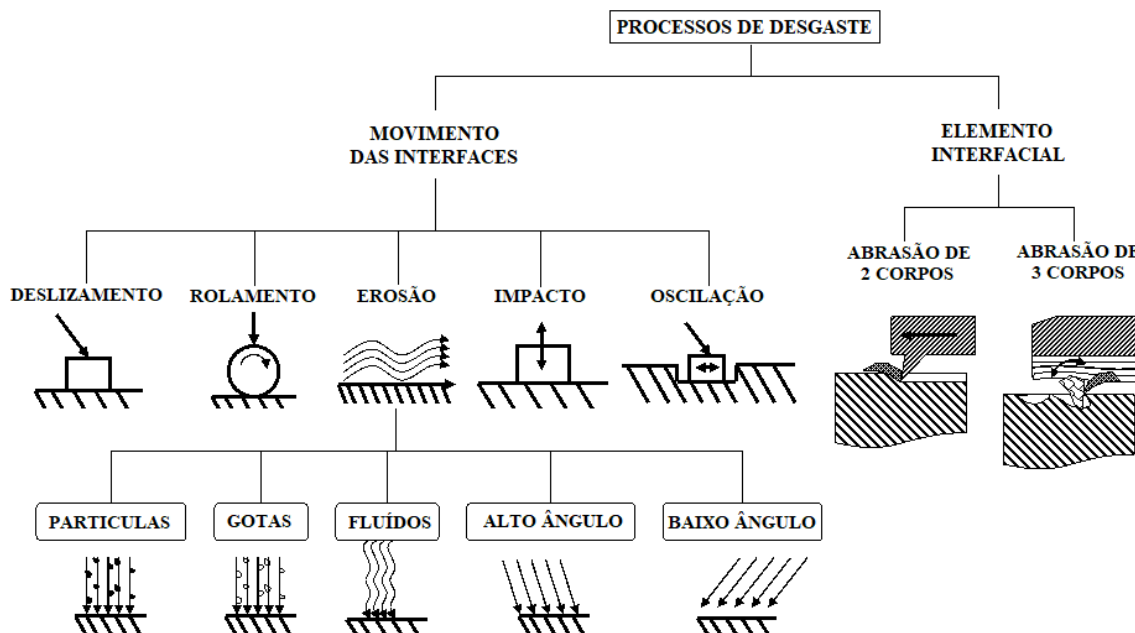


Fonte: Adaptado de KATO, 2001.

O desgaste adesivo ocorre quando a ligação adesiva entre as superfícies é suficientemente forte para resistir ao deslizamento. Como resultado dessa adesão, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material. No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato. Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga. Finalmente, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações triboquímicas e produzem uma intercamada na superfície que depois é removida.

Os modos de desgaste podem ocorrer através de diversos mecanismos. Os mecanismos de desgaste são descritos pela consideração de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante. A Figura 7 mostra um breve resumo destes mecanismos (KATO, 2001).

Figura 7 - Diagrama dos processos de desgaste em função do elemento interfacial e do tipo de movimento das interfaces.



Fonte: Adaptado de KATO, 2001.

O desgaste ocorre em função da cinemática do sistema. Pode variar entre deslizamento, rolamento, oscilação, impacto e erosão, dependendo do tipo de interação e do

movimento das interfaces. A erosão pode ainda ser classificada pelo estado físico do contracorpo, sólido ou líquido, ou pelo ângulo de ação, alto ou baixo. Os processos de desgaste também poderão ser classificados quanto ao elemento interfacial podendo ser de desgaste de 2-corpos ou estar sob ação de partículas sólidas pressionadas entre duas superfícies, por exemplo, poeira em lubrificantes ou minerais em rochas sob pressão, caracterizando um desgaste de 3 corpos (SUSKI, 2004). O pesquisador tem que ter sempre em mente o tipo de aplicação do material que ele deseja testar para que possa simular as mesmas condições de velocidade, de movimento e de carga.

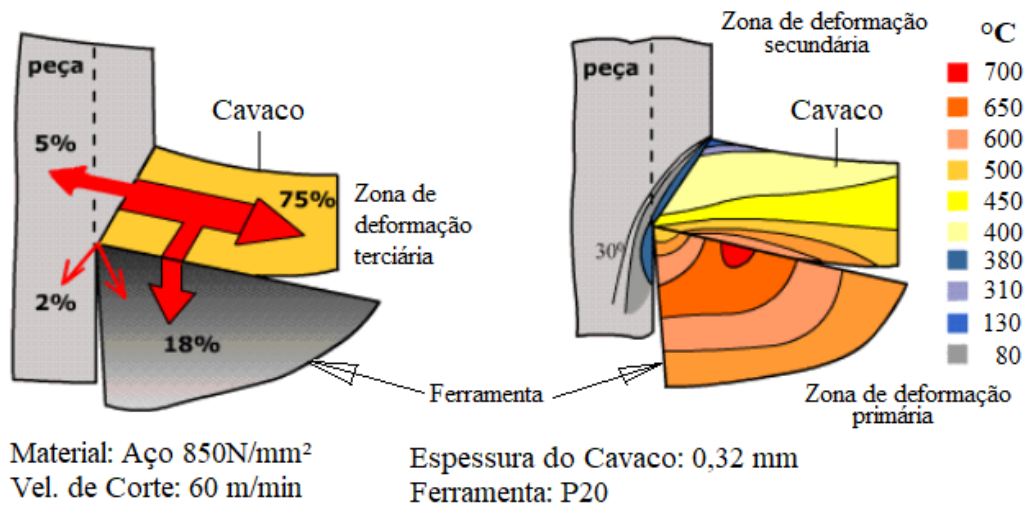
2.7 DESGASTE

Considera-se a perda progressiva de material devida ao movimento relativo entre a superfície e a substância com a qual entra em contato. Está relacionado com interações entre as superfícies e, mais especificamente, a remoção e a deformação do material sobre uma superfície como resultado da ação mecânica da superfície oposta. A necessidade de movimento relativo entre as duas superfícies de contato e mecânica inicial entre asperezas é uma importante distinção entre desgaste mecânico em comparação com outros processos com resultados semelhantes (WILLIAMS, 2005).

2.7.1 Processo de Corte na Usinagem

Para compreender os mecanismos de desgaste no corte de materiais é necessário ter um entendimento básico das severas condições de contato que ocorrem na interface da ferramenta de corte e o material de trabalho, conforme ilustrado na Figura 8. O modelo adotado mostra o corte ortogonal, mas se aplica a todo processo de corte com ferramenta, inclusive no torneamento, fresamento, serramento, furação, rosqueamento, brochamento etc. Um perfil característico de temperatura é estabelecido pelo cisalhamento do material de trabalho ocasionado pela deformação plástica e do deslizamento deste contra o flanco e a superfície de saída da ferramenta. As principais fontes de calor estão localizadas na zona de cisalhamento primária do cavaco que está se formando e no contato de atrito entre o cavaco e a ferramenta na superfície de saída (zona de cisalhamento secundária). Conseqüentemente, a temperatura mais elevada ocorre na superfície de saída a alguma distância da aresta de corte (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

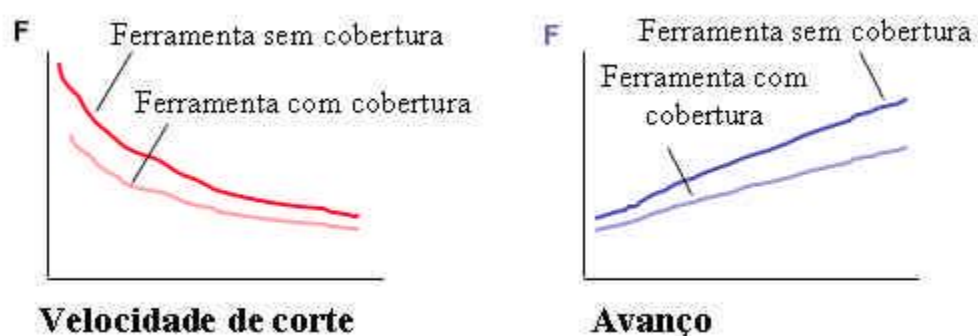
Figura 8 - Distribuição de temperatura na ponta de uma ferramenta de HSS.
Geração de Calor



Fonte: Adaptado de BRANDÃO, 2006.

Geralmente, a força de corte F está relacionada com o avanço e a velocidade de corte indicada para o material em questão, conforme indicado na Figura 9. Também nota-se que um revestimento na superfície da ferramenta pode diminuir o atrito e a força de corte e, assim, gerar uma temperatura mais baixa na aresta de corte, o que pode ser utilizado para melhorar a performance da ferramenta e aumentar a produtividade (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

Figura 9 - Força de corte x velocidade de corte e avanço.



Fonte: HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005.

Entende-se que com base no tipo de mecanismo de falha, as ferramentas de aço rápido são utilizadas próximo aos seus limites de resistência e fratura. Como a aresta de corte da ferramenta está forçando seu caminho pelo interior da peça, como uma cunha em propagação, ambas as superfícies da cunha estão propícias a trincas, e representam um metal

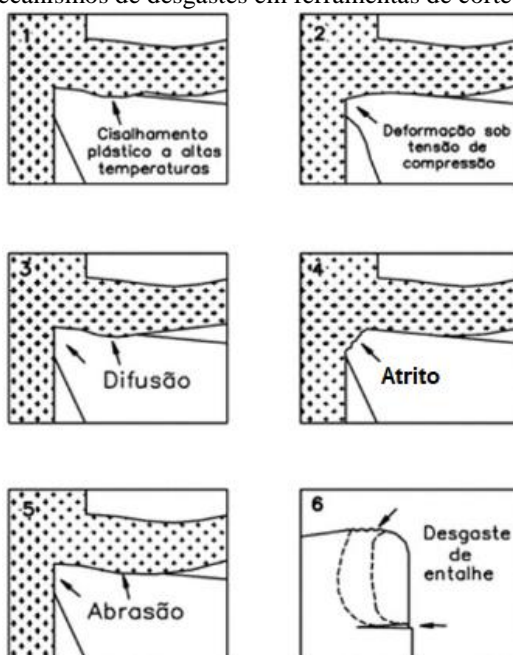
muito reativo quimicamente. O fato de não haver acesso ao oxigênio externo ou a fluidos de corte nessa região, significa que não há formação de filmes de óxido ou qualquer outra camada lubrificante ou intermediária protetora. Conseqüentemente, a aresta de corte da ferramenta também é exposta a condições extremamente severas (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

2.7.2 Mecanismos de Desgastes da Ferramentas

Conforme (MACHADO, 2004), a base para um melhor entendimento de todos os processos de usinagem está no estudo científico da formação dos cavacos.

Observando o modelo de corte ortogonal, as características gerais de desgaste em uma ferramenta de corte de aço rápido são esquematicamente ilustradas na Figura 10. Primeiramente, dependendo da operação de usinagem, parâmetros de corte como: material da peça a ser usinada e material da ferramenta, o desempenho da ferramenta é limitado pelo desgaste da ponta, desgaste de cratera, lascamento da aresta, desgaste de flanco ou uma combinação desses que provocado pelo atrito, conseqüentemente há um aumento de temperatura. O desgaste ocorre gradualmente por abrasão, difusão ou adesão, através da deformação plástica, ou ainda, através de pequenas perdas de material por discretos mecanismos de fratura, ou pela combinação destes (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

Figura 10 - Mecanismos de desgastes em ferramentas de corte de aço rápido.

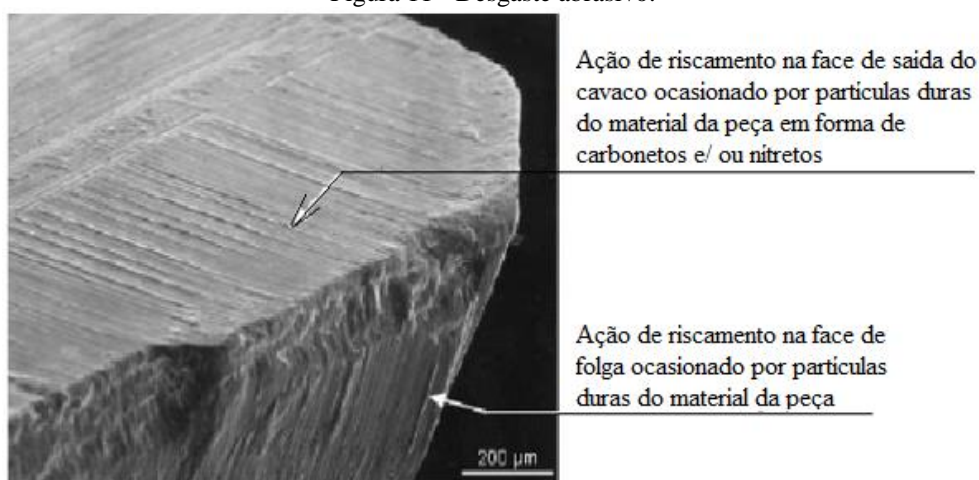


Fonte: TRENT,2000.

2.7.3 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo denomina-se como desgaste de flanco ou de cratera da aresta da ferramenta de aço rápido. Os sulcos na superfície da ferramenta, conforme mostra a Figura 4, é uma combinação da ação de riscamento das partículas duras no material da peça com a proteção contra riscamento oferecida pelas fases de têmpera no material da ferramenta (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005). As setas da Figura 11 apontam para saliências do aço rápido relativamente resistentes a abrasão. Também há evidências de fraturas das arestas.

Figura 11 - Desgaste abrasivo.



Fonte: HOGMARK, OLSSON, 2005.

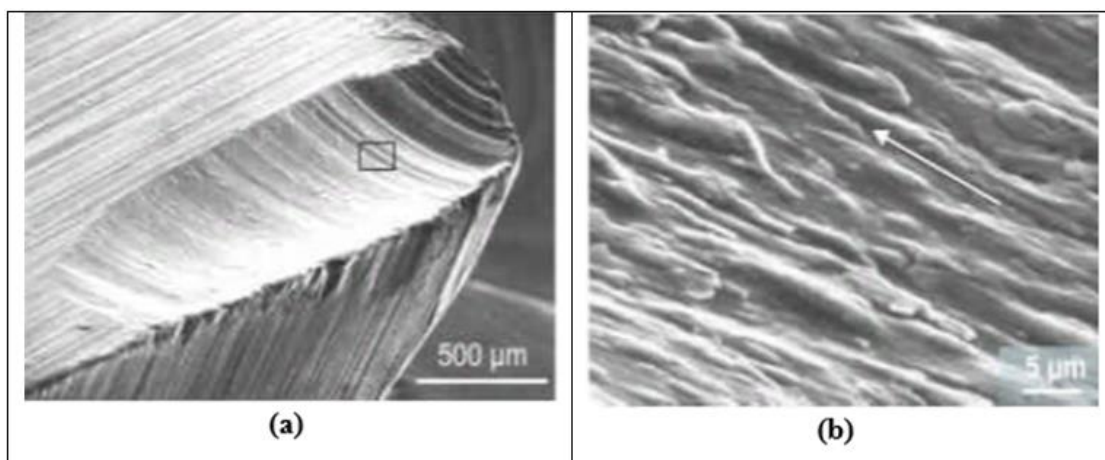
O desgaste abrasivo envolve a perda de material da ferramenta causada pela presença de partículas mais duras que a da ferramenta na peça. Estas partículas podem estar contidas no material da peça em formas de carbonetos e/ou nítretos. Normalmente, este tipo de desgaste se apresenta em forma de riscos paralelos a direção de corte, na superfície de folga e sobre a superfície de saída, na direção de escoamento dos cavacos (TRENT, 2000).

2.7.4 Desgaste por Aderência e Arraste

Quando se observa o mecanismo de desgaste no dente de uma fresa de aço rápido conforme mostra a Figura 12a, inicialmente pode-se considerar que o mecanismo de desgaste é abrasão. Porém uma ampliação maior, Figura 12b, revela que o desgaste por adesão é uma combinação de desgaste por abrasão e desgaste por aderência (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

Esse tipo de desgaste geralmente ocorre em baixas velocidades de corte, nas quais não existe deformação plástica ou difusão, o que pode ser ocasionado pela baixa tensão de escoamento, o que pode ser melhorado com o aumento da velocidade de corte, tornando o cavaco mais laminar provocando sua deformação mais afastada da aresta de corte. Nesta situação, o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Além disso, a aresta postiça de corte também pode aparecer e, se ela for instável, o contato com a ferramenta se torna menos contínuo.

Figura 12 - Desgaste por abrasão e por aderência em uma ferramenta de fresamento de aço rápido.



Fonte: HOGMARK, OLSSON, 2005.

Sob estas condições ocorre aderência de material do cavaco sobre a ferramenta e, quando este material é removido, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente a interface. Estes fragmentos, desgastam por abrasão as porções da ferramenta sobre as quais eles se arrastam (TRENT, 2000); (DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L., 2006) afirmam que, a utilização adequada do fluido de corte que proporciona uma película lubrificante, e o revestimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito, como o nítreto de titânio, podem ajudar a reduzir este tipo de desgaste.

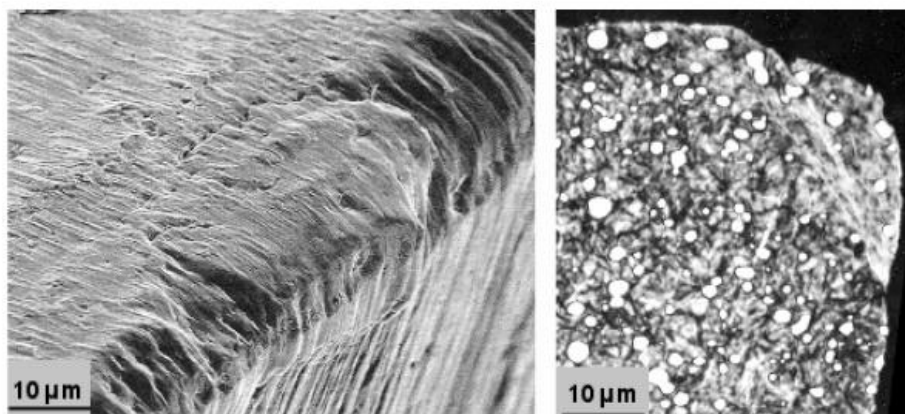
Em operações de corte contínuo, utilizando ferramentas de aço rápido, o mecanismo de aderência e arraste é usualmente uma forma lenta de desgaste e sua tendência é desaparecer em altas velocidades de corte, assim que o fluxo se torne laminar. No entanto, em operações em que há corte interrompido ou falta de rigidez da máquina-ferramenta, pode acontecer uma rápida deterioração da ferramenta. O que é importante destacar, que o mecanismo de aderência e arraste é independente da temperatura (TRENT, 2000).

2.7.5 Desgaste por Deformação Plástica

Considera-se que a deformação plástica da aresta de corte não é propriamente um mecanismo de desgaste, uma vez que não se desprenda material da ferramenta. No entanto, a combinação de altas tensões de compressão, com altas temperaturas na superfície de saída, pode acelerar o processo de desgaste e reduzir a vida da ferramenta. A deformação plástica não é uniforme ao longo da aresta de corte e, frequentemente, inicia-se no raio da ponta da ferramenta. Uma falha repentina iniciada por deformação plástica pode ser de difícil distinção em materiais que sofreram fratura frágil devido a sua baixa tenacidade. As ferramentas de corte são mais propensas a este tipo de desgaste quando a dureza do material da peça é alta e quando for este o fator limitante para a usinagem com ferramentas de aço rápido. A Figura 13 mostra a deformação plástica sofrida na aresta cortante de uma ferramenta de aço rápido. (TRENT, 2000).

Outra forma de deformação plástica é a causada por cisalhamento em altas temperaturas e ocorre na superfície de saída da ferramenta. Na usinagem do aço e outros materiais com alto ponto de fusão, em altas velocidades de corte e altas taxas de avanço, é formada uma cratera próxima a aresta de corte. A formação da cratera se dá na região mais quente da superfície de saída e consiste de material da ferramenta cisalhado e empurrado em sentido contrário ao movimento do cavaco. Ensaios na usinagem do aço carbono, com ferramentas de aço rápido e $V_c = 183 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ no intervalo de 30s, revelaram que o cavaco foi fortemente aderido à superfície da saída. Além disso, em uma análise metalográfica é possível observar que a tensão requerida para cisalhar o material da peça na zona de fluxo, para uma taxa de deformação da ordem de 10^4 s^{-1} , é suficiente para provocar o cisalhamento do material da ferramenta que está em alta temperatura (TRENT, 2000).

Figura 13 - Deformação plástica em uma ferramenta de aço rápido.



Fonte: HOGMARK, OLSSON, 2005.

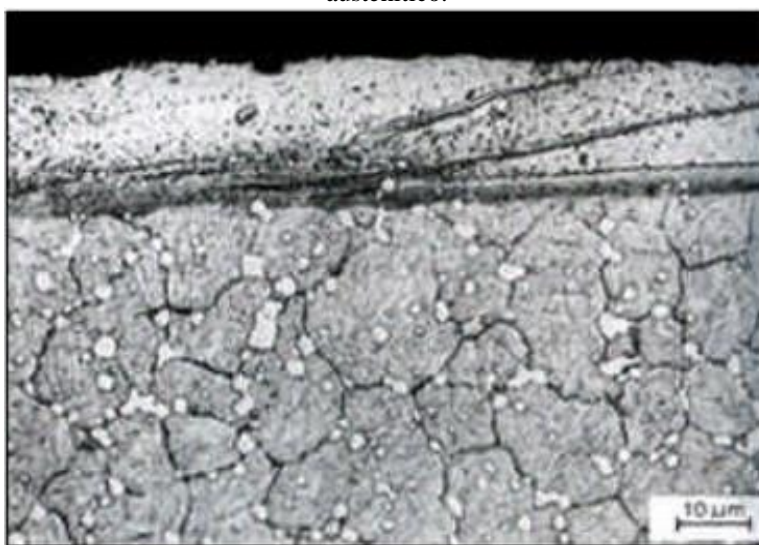
2.7.6 Desgaste Difusivo

Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro. As taxas de difusão aumentam rapidamente com a temperatura, praticamente dobrando com um incremento da ordem de 20°C. Existem fortes evidências de que o desgaste difusivo ocorre principalmente na zona de aderência, região localizada na superfície de saída, na usinagem de aços ou ligas com alto ponto de fusão em altas velocidades de corte. O desgaste difusivo é similar a um ataque químico sobre a superfície de saída da ferramenta. Por exemplo, a difusão de partículas de carboneto contidas em ferramentas de aço rápido, na usinagem do aço carbono, é pequena devido a sua baixa solubilidade.

Entretanto, os átomos de ferro da ferramenta possuem grande facilidade de se transferirem para o material da peça ou do cavaco e vice-versa, o que diminui a dureza da ferramenta e facilita o desgaste abrasivo. A taxa do desgaste difusivo é muito dependente das interações metalúrgicas entre o material da ferramenta e da peça. Em baixas velocidades de corte e em ferramentas de aço rápido é relativamente pequena por causa das baixas temperaturas. Já nas altas velocidades, a taxa de desgaste é maior em razão das maiores temperaturas, mas nesse caso, a deformação plástica pode tornar-se preponderante devido a falta de lubrificação.

A Figura 14 mostra a secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido com uma camada de material da peça (aço) aderido. Nessa posição, próximo onde o cavaco deixa a ferramenta, a temperatura era de aproximadamente 750°C.

Figura 14 - Secção da superfície de saída de uma ferramenta de aço rápido após usar um aço inoxidável austenítico.



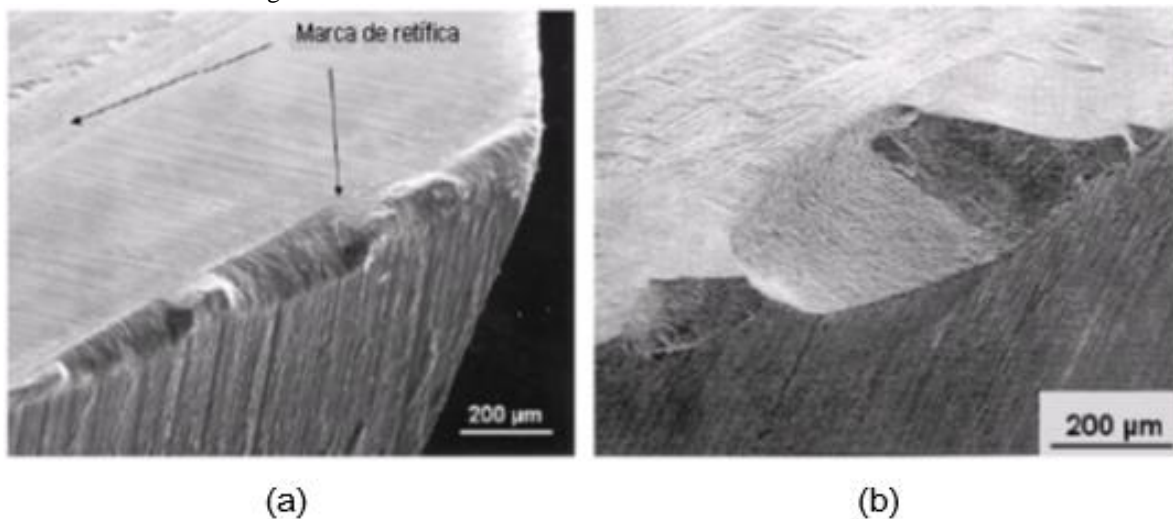
Fonte: TRENT, 2000.

A difusão de elementos de liga da ferramenta na zona de fluxo causou modificações estruturais, que se mostra como um fluxo de partículas escuras, muito pequenas para serem identificadas por microscópio ótico. Essas partículas são carregadas da ferramenta pelo fluxo de cavaco (TRENT, 2000).

2.7.7 Fadiga e Fratura

Grandes fraturas podem ocorrer, porém não é um evento comum de acontecer em ferramentas de aço rápido. É mais comum ocorrer lascamentos na aresta de corte da ferramenta conforme mostram a Figura 15a e Figura 15b. Nota-se que o lascamento parece ter se iniciado pelas marcas de retificação paralelas a aresta de corte durante a retificação da ferramenta e que foi provocado pelo aquecimento. (HOGMARK, S; OLSSON, M., 2005).

Figura 15 - Lascamento da aresta de corte em uma fresa caracol.



Fonte: HOGMARK, OLSSON, 2005.

2.7.8 Tipos de Desgastes em Ferramentas “Brochas”

Os desgastes mais comuns que ocorrerem em brochas são; os desgastes de flanco, desgaste de cratera e desgaste por deformação plástica. A Tabela 3 mostra algumas características dos desgastes mais comuns em brochas e algumas ações para evitar ou minimizar o problema de desgaste (HSS FORUM, 2005).

Tabela 3 - Características de desgastes de brochas e ações para evitar ou minimizar o problema.

Desgaste de Flanco	Desgaste de Cratera	Deformação Plástica
Modelo normal de desgaste	Deve ser limitado	Deve ser evitado
Reduza a velocidade de corte (Vc)	Reduza a velocidade de corte (Vc)	Reduza a velocidade de corte (Vc)
Utilize brochas de aço rápido sinterizado com cobertura	Use brocha com cobertura para evitar o desgaste químico	Aumente o fluxo de líquido refrigerante
Aumente o fluxo de líquido refrigerante	Checar o líquido refrigerante	Use brocha com cobertura

Fonte: Adaptado de HSS FORUM, 2005.

Os cuidados com a limpeza da ferramenta durante o uso e no armazenamento são essenciais para o aumento da vida útil da ferramenta. Por isso recomenda-se a utilização de escovas com cerdas de nylon e vareta de latão na limpeza da ferramenta por mecanismos basculantes. Dessa forma a limpeza se realizará no sentido das costas dos dentes para frente. A Figura 16 apresenta um exemplo de ferramenta utilizada sem a devida limpeza. Isso ocasionou o lascamento e desgaste prematuro dos dentes (HURTH INFER, 2005).

Figura 16 - Dente com lascamento devido acúmulo de cavaco (falta de limpeza).



Fonte: HURTH INFER, 2005.

2.8 ARTROPLASTIA DE QUADRIL

A artroplastia total de quadril é um dos procedimentos com a maior taxa de sucesso da Medicina. Anualmente, centenas de milhares de pacientes são beneficiados do alívio da dor e da melhoria na qualidade de vida proporcionada por uma cirurgia bem sucedida (BUSATO, T. S., 2016).

As primeiras tentativas de tratamento cirúrgico do quadril doloroso datam de 1780, com as primeiras descrições de Henry Park, cirurgião inglês discípulo de Pott. Consistia da retirada do fêmur proximal e da cápsula articular. Consta que Park encontrou muita resistência de seus colegas que preferiam um método mais prático e rápido para a época, a amputação, já que não existia ainda a Anestesia, que só surgiria em 1846 (BUSATO, T. S., 2016).

Por volta de 1860 começavam as artroplastias de interposição. Nesta época intercalava-se algum material entre as extremidades ósseas (do fêmur e da bacia) na tentativa de produzir-se movimento e alívio da dor.

O francês Ollier, considerado o pai da cirurgia ortopédica, é a referência. Testou o uso de gordura intra-articular sem muito sucesso, mas seu conceito inicial se perpetua. Prosseguem as tentativas, agora com o tcheco Chlumsky, que sistematicamente usa diversos materiais como: músculo, celulóide, prata, borracha, magnésio, zinco, vidro, cera, etc. É muito curioso notar que Chlumsky rotineiramente testava seus implantes nos animais de seu laboratório antes de implantá-los em humanos, o que era absolutamente atípico em sua época (BUSATO, T. S., 2016).

Em 1891 o alemão Gluck inicia as tentativas de fixação de uma prótese de marfim ao osso, com o uso de parafusos metálicos e eventualmente gesso e resinas. É interessante ressaltar que as radiografias só seriam inventadas em 1895, pelo alemão Roentgen e todo o progresso até aqui se baseava apenas em achados clínicos e cirúrgicos, sem exames de imagem (UFRGS, 2014).

Artroplastia de quadril é o nome dado ao procedimento para substituição do quadril natural por outro quadril protético. O termo artroplastia é o mais correto, pois refere-se ao procedimento cirúrgico em si; a substituição da articulação.

A indicação clássica para este procedimento é a coxartrose (é um **termo** usado genericamente para denominar o processo degenerativo das cartilagens provocado pelo desgaste do acetábulo-cabeça femoral). Quando o quadril sofre um processo degenerativo e torna-se doloroso e limitado, esta cirurgia pode ser indicada para restaurar o movimento e aliviar a dor, melhorando sua qualidade de vida. Também podemos usar as próteses de quadril no tratamento de algumas fraturas do colo femoral, conforme Figura 17 (BUSATO, T. S., 2016).

Figura 17 - Prótese de quadril.



Fonte: BUSATO T. S., 2016.

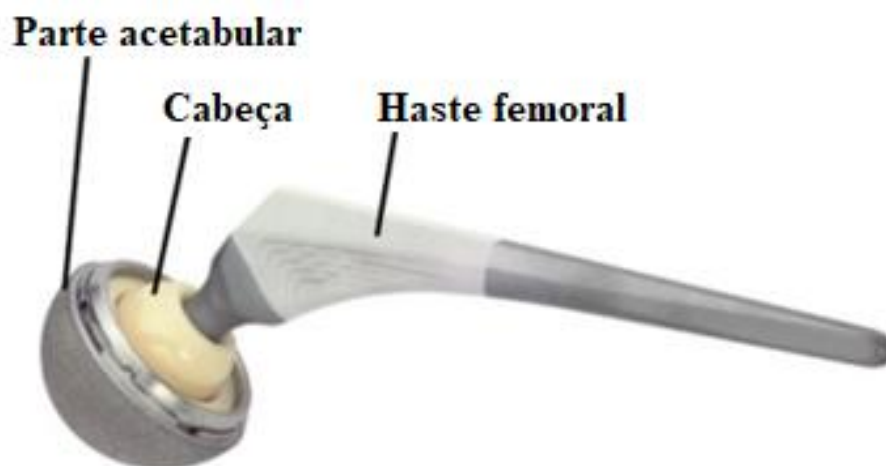
2.9 A PRÓTESE

De modo simplista, próteses são substitutos artificiais para regiões danificadas do corpo. Uma prótese total clássica de quadril constitui-se basicamente de um componente femoral, um componente acetabular (na bacia) e uma cabeça esférica (COSTA, S., 2018).

Existem vários tipos diferentes de próteses em relação a tamanho, modelo, conceito, meio de fixação ao osso, superfícies de contato, etc.

A Figura 18, representa um modelo ilustrativo de uma prótese total de quadril não-cimentada, cerâmica-cerâmica, com seus componentes básicos.

Figura 18 - Prótese total de quadril não cimentada.



Fonte: Adaptado de BUSATO, T. S., 2016.

Na prótese total de quadril clássica a cabeça femoral é removida junto com sua cartilagem desgastada. Então procede-se à fresagem (ou raspagem) do acetábulo, cria-se uma cavidade hemisférica e removem-se os restos de cartilagem danificada.

O implante acetabular, agora pode ser fixado ao osso por pressão com ou sem o uso de parafusos suplementares de fixação. Também pode ser cimentado ao osso, dependendo do tipo de prótese usada.

O cimento ósseo ou polimetilmetacrilato é um polímero termoplástico de secagem rápida muito usado em cirurgias ortopédicas e na odontologia e não tem qualquer relação com o cimento que conhecemos da construção civil. (BUSATO, T. S., 2015).

O canal do fêmur é preparado para receber a haste femoral, a qual pode também ser fixada ao osso por *press-fit* ou por cimento ósseo, dependendo do modelo indicado no caso. Na Figura 19, as etapas básicas de uma cirurgia.

Figura 19 - Etapas de uma cirurgia.



Fonte: BUSATO, T. S., 2015.

Existe uma infinidade de modelos e de fabricantes de próteses no mercado mundial. Os modelos diferem principalmente quanto à superfície de contato, meios de fixação ao osso, filosofia de tratamento e detalhes de *design* (BUSATO, T. S., 2016).

2.10 FERRAMENTAS PARA ASSENTAMENTO DE PRÓTESES DE QUADRIL

2.10.1 Fresas

Após a luxação da articulação femoral e osteotomia do colo do fêmur a cerca de 1,0 a 1,5 cm do pequeno trocanter, se inicia a fresagem do canal femoral com a fresa reta e mais delgada no quadrante pósterior medial do fêmur. As fresas retas (Figura 20) possuem um desenho cônico semelhante ao canal femoral e ao desenho do implante (BAUMER, 2015).

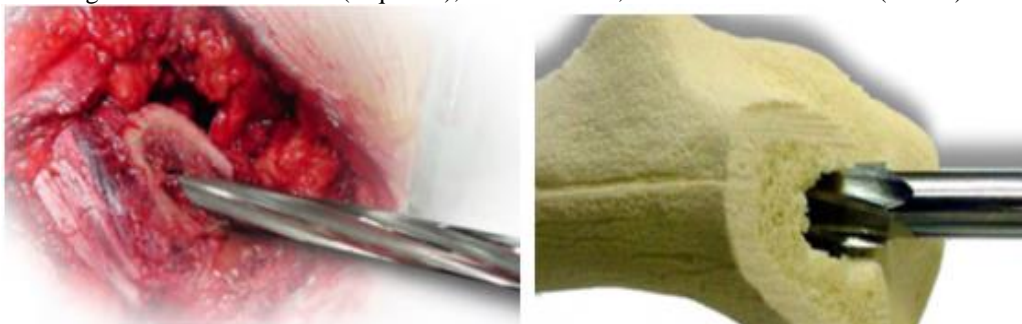
Figura 20 - Fresa reta.



Fonte: BAUMER. 2015.

Logo após é realizado o fresamento com uma segunda fresa reta, com dimensões maiores que permite uma abertura maior do canal femoral, que facilita de sobremaneira a utilização das raspas femorais que serão a seguir utilizadas. A fresa reta deve ser introduzida em toda sua extensão no interior do canal femoral. A Figura 21 (esquerda), mostra o início da fresagem com a segunda fresa e a Figura 21 da direita, mostra a segunda fresa totalmente introduzida (BAUMER, 2015).

Figura 21 - 1ª Fresa reta. (esquerda), a 2ª Fresa reta, totalmente introduzida (direita).



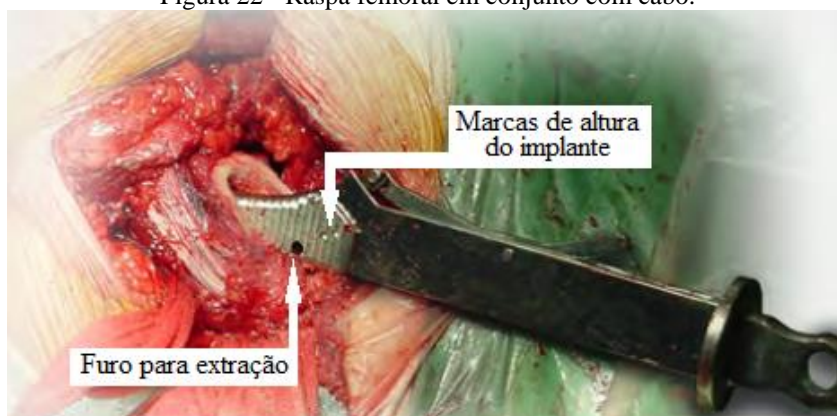
Fonte: BAUMER. 2015.

2.10.2 Instrumentos Raspadores Femorais

Os instrumentos, raspas femorais, em conjunto com o cabo, deverão ser utilizados de forma progressivas em conjunto de quatro instrumentos de 0 até 3, obedecendo ao planejamento pré-operatório (BAUMER, 2015).

As marcas nos raspadores correspondem à altura em que o implante femoral definitivo deve ser introduzido no canal femoral, obedecendo a determinação pré-operatória. O orifício mais distante existente no corpo dos raspadores femorais é utilizado para extrair o corpo deste, se por ventura ocorrer qualquer acidente durante a raspagem (Figura 22)

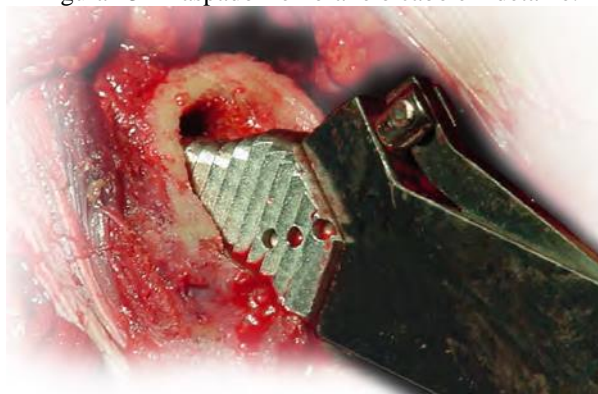
Figura 22 - Raspa femoral em conjunto com cabo.



Fonte: BAUMER. 2015.

Para que os raspadores femorais (Figura 23) possam se coaptar bem na região do trocanter maior, deve se escariar bem esta região com os próprios raspadores femorais. A abertura adequada na região trocanteriana facilita a introdução do implante (BAUMER, 2015).

Figura 23 - Raspador femoral e o cabo em detalhe.



Fonte: BAUMER. 2015.

2.10.3 Raspador Teste e a Cabeça de Teste

Os raspadores femorais permitem a colocação da cabeça de teste, que é acoplado a ele (Figura 24) para a determinação do comprimento do colo do membro que está sendo operado, e com isto, propicia uma equalização deste.

Figura 24 - Raspador teste e cabeça de teste.



Fonte: BAUMER, 2015.

Após a raspagem e a preparação adequada do canal femoral, é possível visualizar um canal perfeito e homogêneo, conforme a imagem da Figura 25, pronto para a cimentação e introdução do implante definitivo (BAUMER, 2015).

A determinação da altura do componente femoral a ser introduzido é representada pelas marcas existentes na lateral do corpo do raspador e do impactor de enxerto, sendo que a distância existente entre os dois riscos horizontais, representada por uma linha vertical é o quanto o implante definitivo pode migrar linearmente.

Figura 25 - Preparação adequada do canal femoral (esquerda) e Posicionamento definitivo (direita).



Fonte: BAUMER, 2015.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

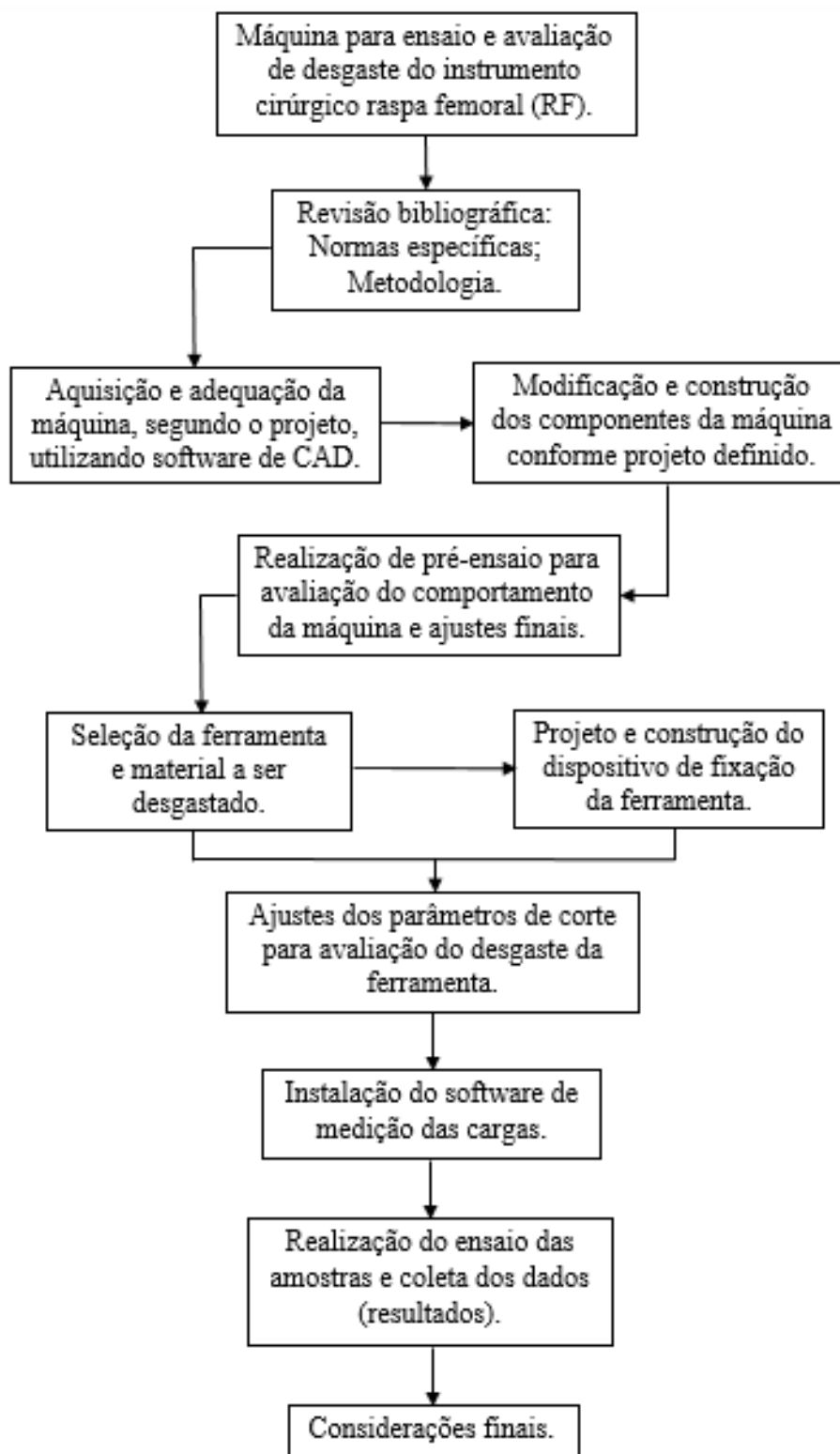
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

O primeiro passo foi realizar uma pesquisa bibliográfica da escolha e modificação do equipamento conforme norma NBRNM-ISO 230-1, que satisfaça o grau de liberdade de movimentos para a realização do ensaio, bem como as demais normas indicadas nela, mantendo como foco encontrar os pontos aplicáveis ao equipamento a serem trabalhados. Embora a norma trate de máquinas em geral, possui também pontos específicos de vários tipos de equipamentos.

A pesquisa bibliográfica acompanhou todas as etapas deste trabalho, pois a medida que foram sendo realizadas as atividades pertinentes a conclusão do mesmo, surgiram novos pontos e aspectos a serem estudados com maior profundidade.

Se tem como foco principal a adequação do equipamento, visando obter resultados satisfatórios para sua validação como “equipamento para ensaios de avaliação do desgaste em instrumento cirúrgico” Raspa femoral (RF), usado para preparação do alojamento de próteses totais de articulação de quadril. O organograma da Figura 26 mostra as etapas do desenvolvimento deste trabalho e a metodologia adotada.

Figura 26 - Organograma das principais etapas realizadas na validação da máquina de ensaios para avaliação de desgaste em instrumento cirúrgico (Raspa femoral) usado para alojamento de próteses totais de articulação de quadril.



Fonte: Autor.

3.2 PROJETO E ADEQUAÇÃO DA MÁQUINA PARA ENSAIO DE DESGASTE

Como visto, a etapa experimental se dividiu em duas partes principais, são elas:

Etapa 1: O projeto e a construção da máquina de ensaios para avaliação de desgaste em RF, usado para alojamento de próteses totais de articulação de quadril realizados com o objetivo de atender às especificações recomendadas.

Os principais critérios adotados para o projeto da máquina foram:

- Aquisição no mercado industrial de uma máquina para reprodução dos movimentos retilíneos alternados necessários;
- Os dispositivos que promovem o acionamento dos graus de liberdade devem ser totalmente automatizados para uma redução de atrito;
- Os componentes mecânicos, que promovem os graus de liberdade, devem ser facilmente ajustados para atender a outros parâmetros e/ou especificações de ensaio;
- Conter sistema que replique os movimentos a que o instrumento cirúrgico deve ser submetido;
- O mecanismo que promove o acionamento deverá ser totalmente automatizado, objetivando sua repetitividade de movimento retilíneo alternado com ação de corte somente em um sentido, assim evitando o desgaste do instrumento no recuo;

Para a realização deste trabalho tomou-se como base o tipo de movimento ao qual submete-se o instrumento protético, sendo esse o movimento retilíneo alternado, e para isso buscou-se no mercado um equipamento que reproduziria tais movimentos. Desta forma o equipamento existente no mercado que atendeu aos critérios adotados e de fácil aquisição para o desenvolvimento do projeto foi uma plaina limadora horizontal.

Se adquiriu o equipamento da indústria (empresa Metalúrgica Gaúcha a qual encerrava suas atividades). A máquina se apresentava em péssimo estado de conservação conforme imagens da Figura 27, com isso, se conseguiu a aquisição a baixo custo. Após a aquisição da máquina, houve o transporte para o laboratório da UFRGS/CADETEC, onde se realizou a desmontagem e a limpeza dos componentes da mesma, para posterior adequação e modificação conforme projeto.

Figura 27 - Equipamento adquirido junto à empresa, Metalúrgica Gaúcha.

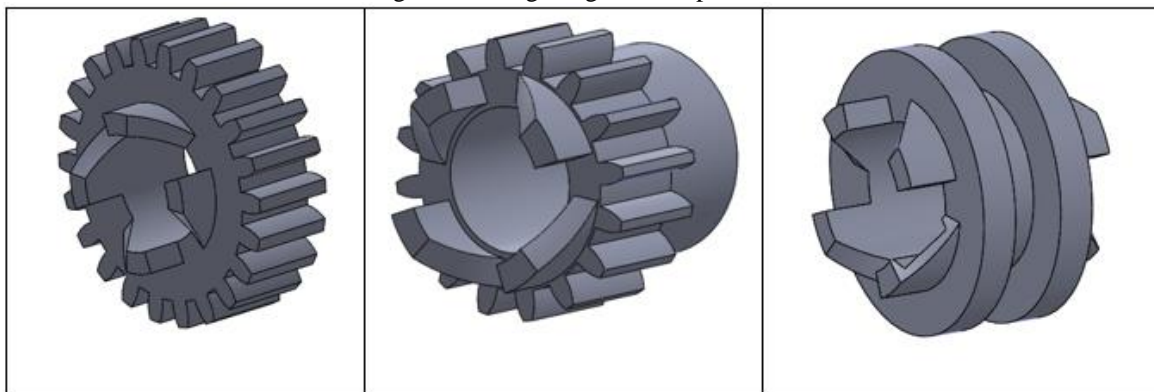


Fonte: Autor.

Para o acionamento foi selecionado um motor elétrico, com 0,5 CV de potência nominal com 1740 RPM e redução de rotação no eixo principal numa relação de 5/1, resultando numa rotação do eixo principal de acionamento da máquina de 348 RPM (5,8 Hz). O eixo principal é contemplado com duas engrenagens de dentes retos (Figura 28), uma com diâmetro de 48mm e número de dentes $Z= 16$ e a segunda engrenagem com diâmetro de 66 mm e $Z= 22$, o segundo eixo com duas engrenagens uma com diâmetro de 94 mm e número de dentes $Z= 32$ e a segunda engrenagem com diâmetro de 77 mm e $Z= 26$, assim sendo, no eixo principal as engrenagem nele acopladas são de livre rotação, tendo a chaveta como o acoplamento, ou elemento de arraste das engrenagens conforme mostra a Figura 29.

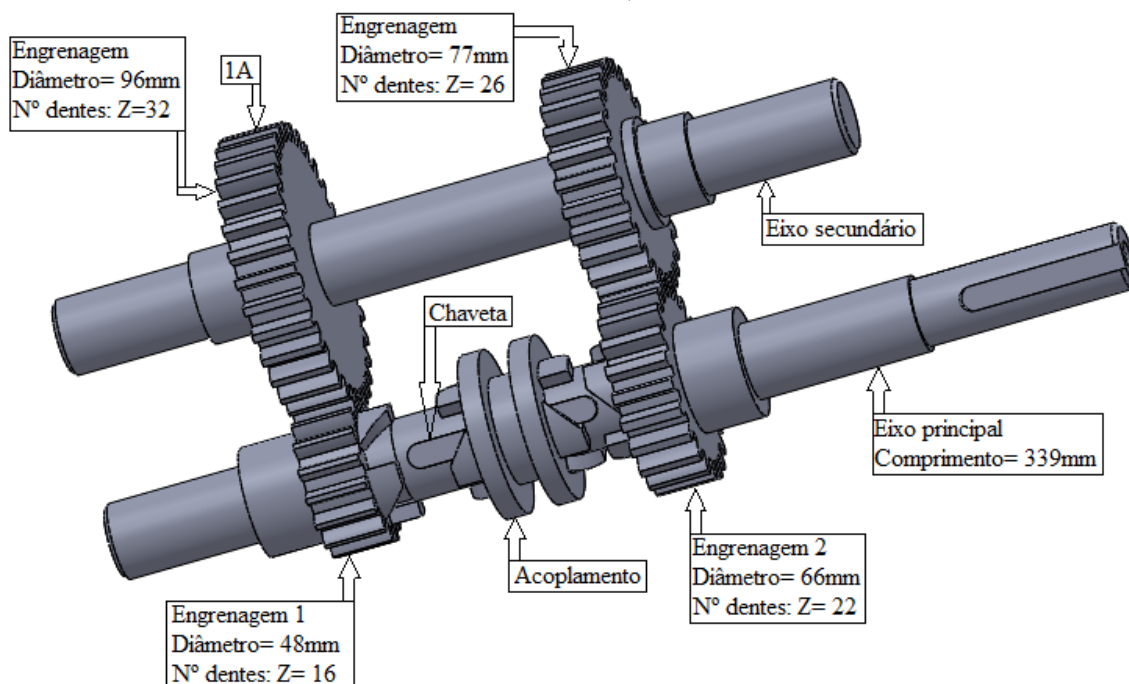
Movimentando o acoplamento para a esquerda, este acopla à engrenagem 1, que irá rotacionar o eixo secundário com 177,7 RPM (2,96 Hz) e movimentando o acoplamento para a direita acopla na engrenagem 2 que girará com 298,3 RPM (4,97 Hz).

Figura 28 - Engrenagens e acoplamento.



Fonte: Autor.

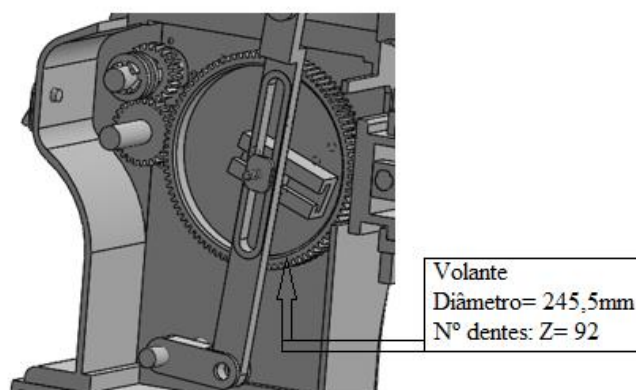
Figura 29 - Imagem esquemática do Sistema de mudança de velocidade de movimento (caixa de velocidades).



Fonte: Autor.

A mudança de movimento rotativo para movimento retilíneo alternado acontece com a ligação da engrenagem 1A acoplada ao volante, Figura 30, com diâmetro de 245,5 mm e $Z=92$, resultando em uma redução de RPM conforme engrenagens 1 e 2 para (RPM volante 1= 68 e RPM volante 2= 93,6).

Figura 30 - Imagem esquemática do volante Sistema de mudança de velocidade (vista em corte).

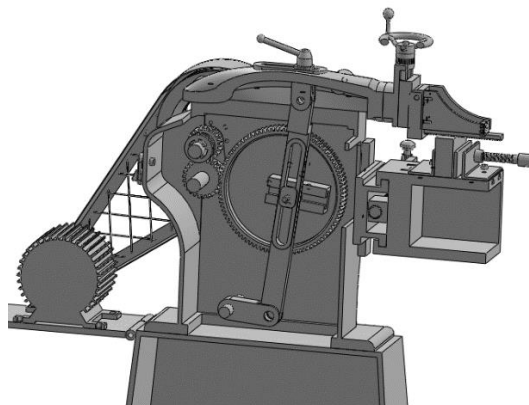


Fonte: Autor.

O movimento retilíneo alternado acontece através da biela conforme Figura 31 e para variar a rotação do motor elétrico foi instalado um variador de frequência. Considerando o

sistema de baixa frequência, que a norma estabelece de 1 Hz a 80 Hz, a rotação final satisfaz a frequência normalizada de ensaio (INMETRO, 2015).

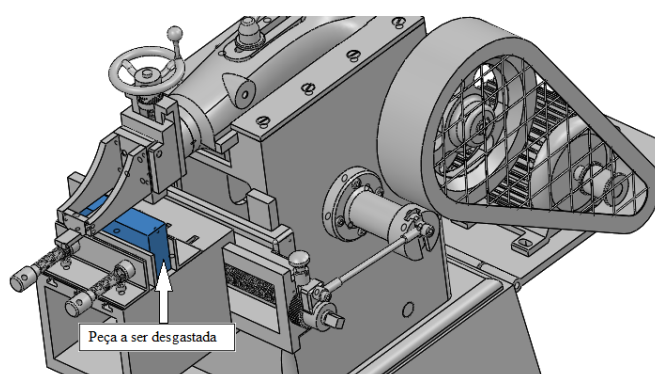
Figura 31 - Imagem esquemática do Sistema de alteração do movimento de rotação para movimento retilíneo alternado (vista em corte).



Fonte: Autor.

O sistema de aplicação da profundidade de corte durante o ensaio foi planejado a partir do projeto de fixação do material a ser desgastado na avaliação do comportamento da máquina durante os ensaios. A fixação é composta de uma mandíbula fixa e outra móvel, sendo as duas mandíbulas com faces planas sem estrias, e com o aperto do material a ser desgastado feito por intermédio da mandíbula móvel ajustada por dois parafusos, o sistema de fixação é acoplado à mesa principal da máquina conforme mostra a Figura 32.

Figura 32 - Imagem do sistema de fixação da peça a ser desgastada sobre a mesa de trabalho.



Fonte: Autor.

O princípio de funcionamento da máquina, conforme pode ser observado na Figura 33 consiste de um motor elétrico, que aciona o eixo principal, dotado de engrenagens e de uma polia, o qual movimentava um volante com um eixo excêntrico e um fuso roscado para ajuste do comprimento do curso do instrumento cortante, este é responsável pelo movimento

de uma biela que ocasiona o movimento retilíneo alternado do torpedo com um dispositivo (espera), onde é fixado a RF A Figura 34 apresenta uma vista geral do equipamento.

A profundidade de corte é determinada através de um ajuste fino, com um anel graduado com divisão de 0,1 mm. O movimento de corte é ocasionado pelo avanço e recuo do torpedo, sendo o corte realizado somente no avanço do instrumento cortante; no recuo o dispositivo afasta o instrumento para evitar o desgaste por atrito.

O avanço intermitente da mesa de trabalho é realizado através de um excêntrico acoplado no eixo do volante e ligado a um trínquete por meio de uma barra cilíndrica ajustável, que determina o valor do avanço transversal da mesa. Se determinou o avanço, para fins do ensaio, em 0,01 mm por golpe do instrumento, sendo este calculado conforme a Equação 2. Avanço da Mesa por Volta.

Equação 2. Avanço da Mesa por Volta

$$(2) \text{ Avanço da mesa por volta} \quad A = \frac{P}{N} \quad (\text{em mm/volta})$$

Onde:

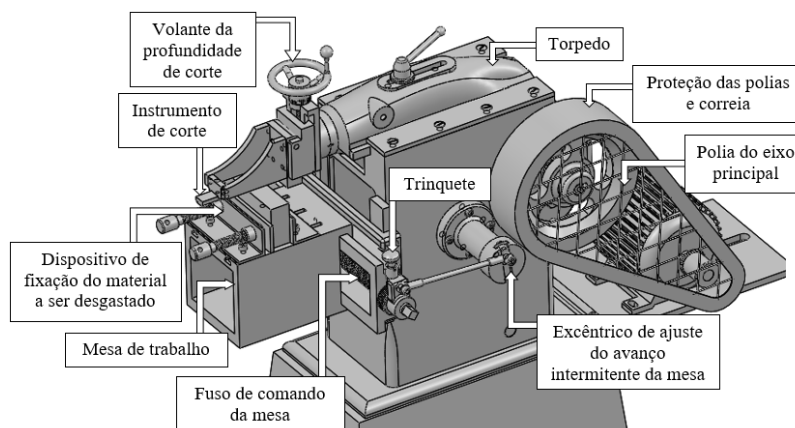
A é o avanço da mesa;

P é o passo do parafuso de comando da mesa;

N o número de dentes da engrenagem do trínquete.

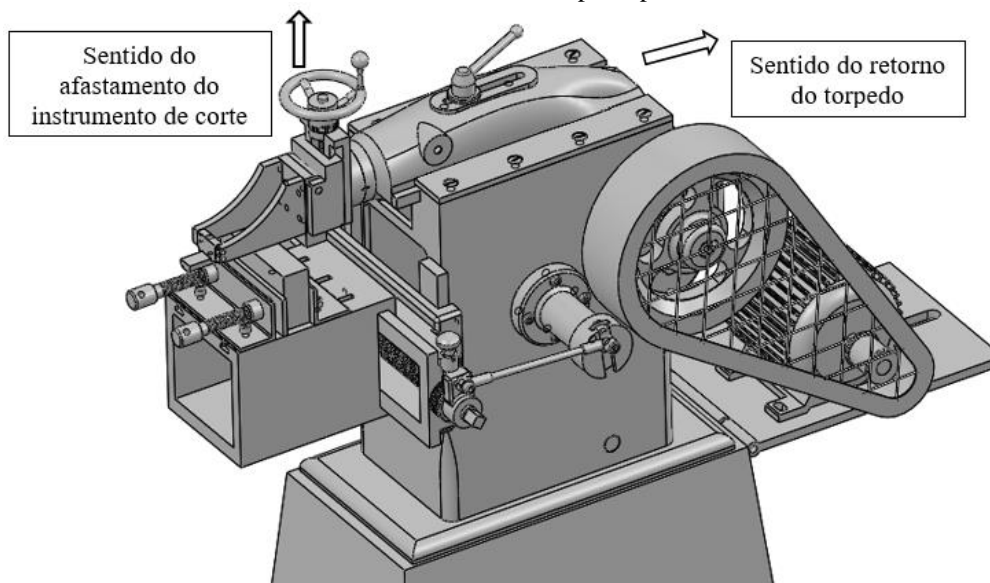
Para a fixação do material de ensaio foi projetado um dispositivo de aperto e acoplado sobre a mesa de trabalho.

Figura 33 - Descrição das partes da máquina.



Fonte: Autor.

Figura 34 - Vista geral da máquina de ensaios de desgaste em RF projetada. Destacam-se os dois postos de trabalho e os eixos de acionamento principal e secundário.



Fonte: Autor.

Todo o equipamento foi projetado e modificado a partir de uma plaina limadora de 300 mm de curso. Para tanto, se adotou o seguinte:

- ✓ Desmontagem de todo o conjunto;
- ✓ Avaliação de todos os componentes;
- ✓ Descarte de componentes danificados/desgastados;
- ✓ Confecção de componentes para substituição (engrenagens e acoplamento responsáveis pela mudança do número de golpes por minuto (GPM));

Para detrerminação do número de golpes por minuto, se utilizou a Equação 3. Golpes por Minuto.

Equação 3. Golpes por Minuto.

$$(3) \text{ Golpes por minuto} \quad GPM = \frac{Vc \times 1000}{2 \times C}$$

Onde:

GPM= Golpes por minuto

Vc = Velocidade de corte,

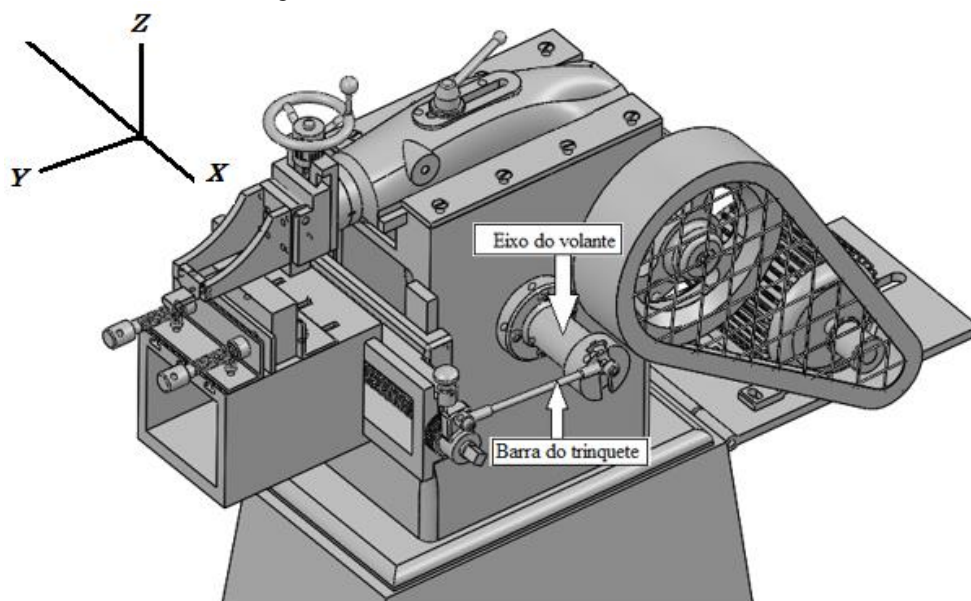
C = Comprimento do curso

A fim de evitar desgaste da ferramenta de corte durante o retorno da mesma, se construiu, no laboratório de processos mecânicos do IFSUL (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul Riograndense - Campus Charqueadas), um pêndulo, o qual foi acoplado a um eixo fixado no torpedão.

3.3 MOVIMENTOS DURANTE O ENSAIO

Durante a realização deste projeto, houve preocupação com a identificação de possíveis variações nos resultados de movimentação da máquina que pudessem comprometer a estabilidade da mesma, até o final do ensaio de avaliação. Se considerou que as avaliações de estabilidade apresentaram resultados qualitativos satisfatórios. A Figura 35, mostra os movimentos provocados pela máquina durante o ensaio.

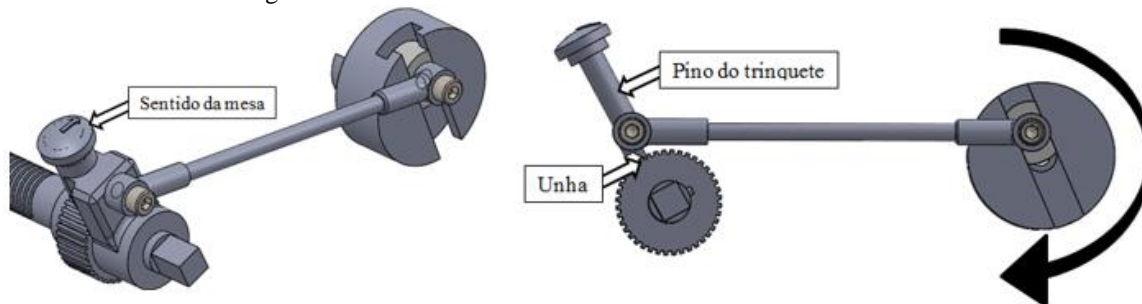
Figura 35 - Sentidos de movimentos da mesa.



Fonte: Autor.

Os movimentos da mesa acontecem através do eixo do volante, Figura 35, que transmite o movimento por intermédio da barra do trinquete para a roda dentada, esta através da unha do trinquete arrasta um dente da roda dentada de número de dentes $Z=40$, girando o parafuso de comando da mesa, realizando o movimento intermitente de 0,1 mm em cada golpe do instrumento cortante. Este movimento pode acontecer nos dois sentidos do eixo X, bastando para isso, girar o pino do trinquete em 180° , Figura 36.

Figura 36 - Sistema do movimento nos dois sentidos do eixo X.

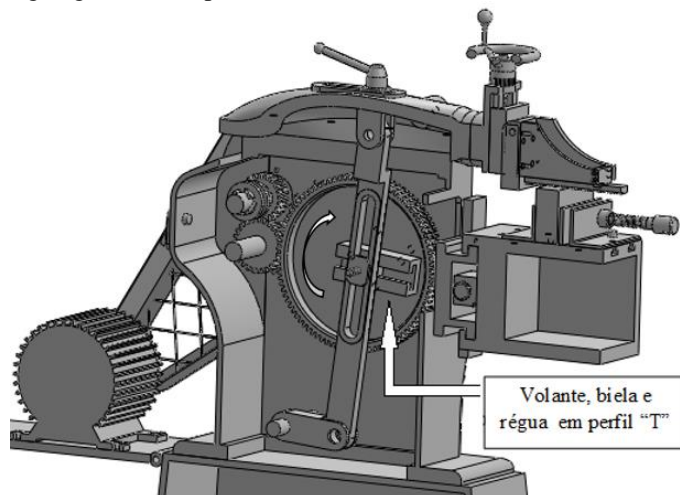


Fonte: Autor.

Conforme se apresentou acima, o movimento no eixo X, nos dois sentidos acontecem de modo automático e preciso.

O movimento do eixo Y se dá através do giro do volante provido de uma régua com encaixe em Tê e uma biela que transforma o movimento rotativo em movimento retilíneo alternado, a qual regula o comprimento do curso do instrumento cortante. O comprimento do curso acontece quando se regula a distância da biela em relação ao centro do volante através do parafuso, conforme mostrado na Figura 37.

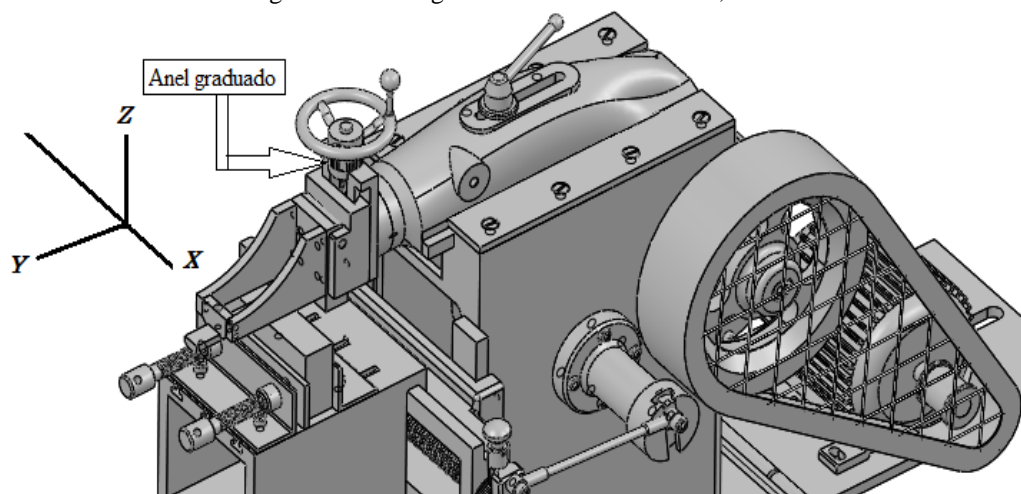
Figura 37 - Regulagem do comprimento do curso do instrumento cortante (vista em corte).



Fonte: Autor.

O movimento do eixo Z é responsável pela profundidade do instrumento no corte sendo feito manualmente e sua precisão é controlada por um parafuso de comando com rosca de perfil quadrado e pelo anel graduado com divisão de 0,1 mm, Figura 38.

Figura 38 - Anel graduado com divisão de 0,1mm.



Fonte: Autor.

3.4 ESTABILIDADE DA MÁQUINA

O comportamento das variáveis mecânica (movimentos transversal e vertical) do equipamento durante os ensaios de desgaste podem representar um importante resultado para a validação da máquina, pois possuem anel graduado com divisão de 0,05 mm, e principalmente pela sua capacidade de reproduzir os deslocamentos previamente estabelecidos, considerando que os elementos em movimentos rotativo e retilíneo alternado foram previamente ajustados e lubrificados para que suporte a ação dos ensaios.

Se considerou a possibilidade de desgaste dos componentes e a efetiva influência de cada um destes desgastes nos resultados finais da avaliação. Se avaliou, com intervalos de 3 horas, os elementos responsáveis pelos movimentos, após cada avaliação, se procedeu ajustes e lubrificação dos mesmos visando manter o bom funcionamento durante a operação.

3.5 FERRAMENTAS DE DESGASTE

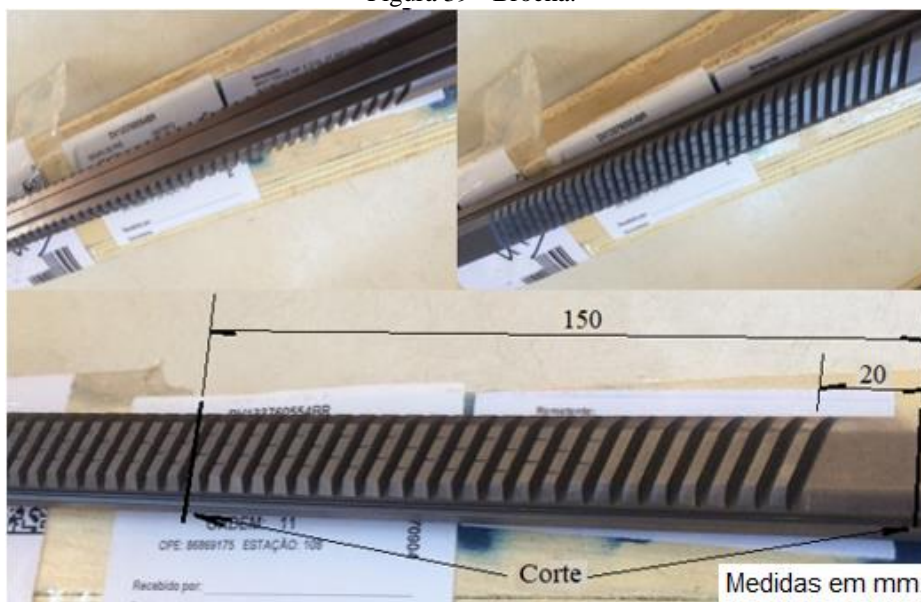
Para a realização do ensaio de desgaste e avaliação do comportamento da máquina utilizou-se uma ferramenta de usinagem de múltiplos dentes progressivos cuidadosamente projetados e dimensionados para o corte (Brocha), construída de material M2, aço rápido ligado ao molibdênio, vanádio e tungstênio a qual apresenta alta temperabilidade, alta resistência ao desgaste e alta tenacidade, com dureza entre 64 – 66 HRC.

A brocha foi doada pela empresa Navy Tools Ind e Com de Brochas Ltda.

Para proceder com o ensaio de desgaste da ferramenta se optou por um bloco compacto refratário por ser abrasivo, o qual apresenta em sua composição: magnesita, alumina, sílica, berília, zircônia, mulita, além de outros compostos à base de carbeto de baixa granulação.

A ferramenta brocha foi enviada submetida a corte pelo processo de jato d'água transformando em duas ferramentas, o qual não altera a microestrutura da ferramenta por não haver aquecimento na região do corte. O procedimento de corte se realizou no laboratório da UFRGS/CADETEC. Uma das extremidades de cada parte fracionada apresenta região de aproximadamente 20 mm sem os vãos dos dentes as quais servem para fixação no suporte, conforme Figura 39.

Figura 39 - Brocha.

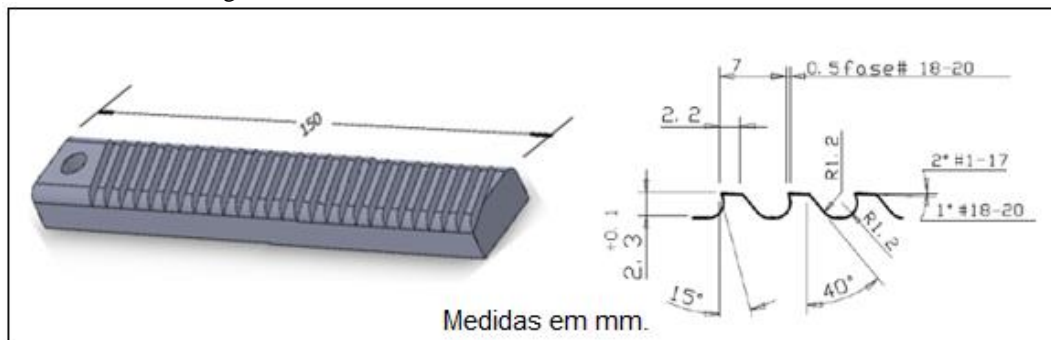


Fonte: Autor.

3.6 FERRAMENTAS UTILIZADAS

Os ensaios foram realizados com duas ferramentas feitas a partir de uma brocha, conforme descrito anteriormente. As ferramentas apresentam área útil de 150 mm, sendo utilizado para análise de desgaste a região central com comprimento de 50 mm conforme Figura 40.

Figura 40 - Detalhe da ferramenta e das dimensões dos dentes.

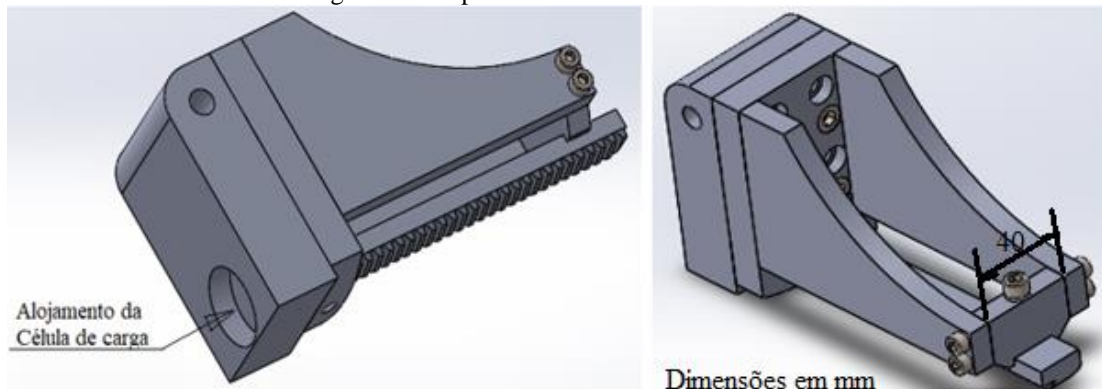


Fonte: Autor.

3.7 SUPORTE DE FIXAÇÃO

Para fixação da ferramenta foi projetado e construído um novo suporte conforme a secção da ferramenta, com capacidade de resistir aos esforços de corte e provido de parafusos com a finalidade de ajustes para regulagem do alinhamento da ferramenta, proporcionando rigidez na fixação da mesma e também garantir o alojamento da célula de carga, conforme Figura 41.

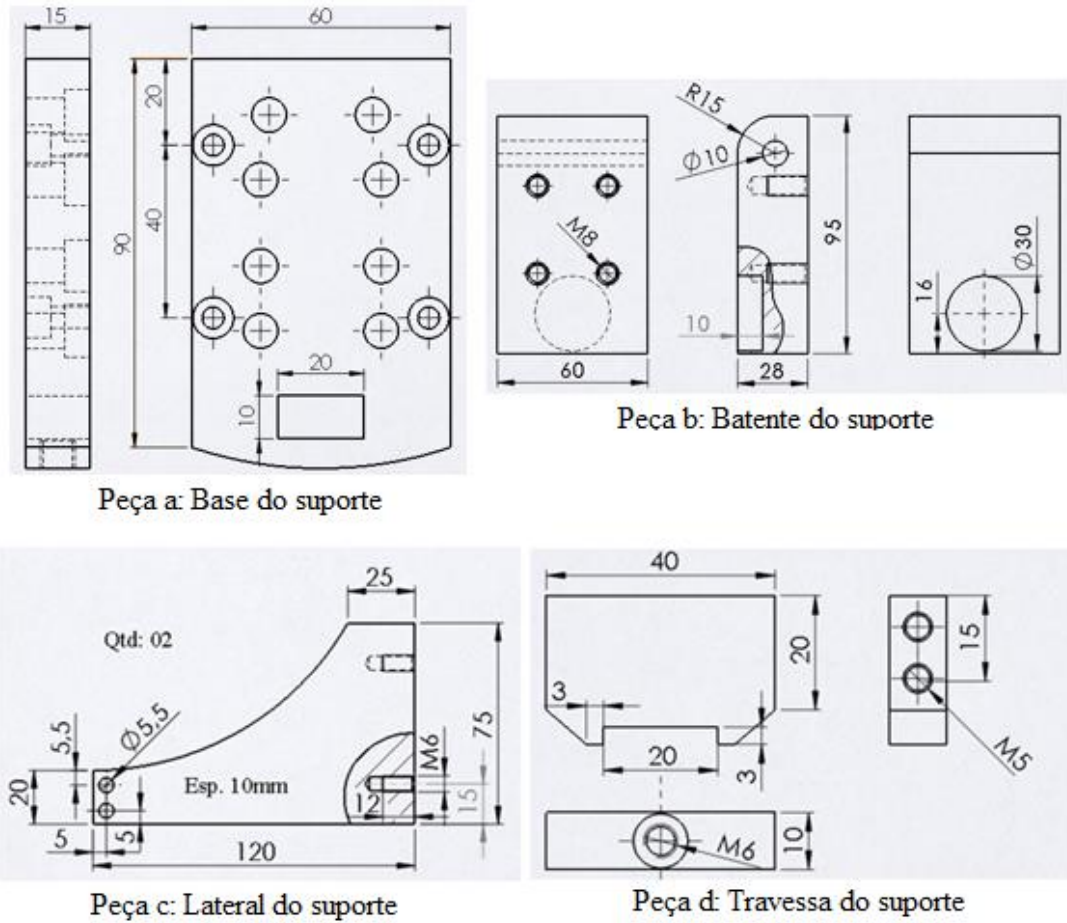
Figura 41 - Suporte com a ferramenta montada.



Fonte: Autor.

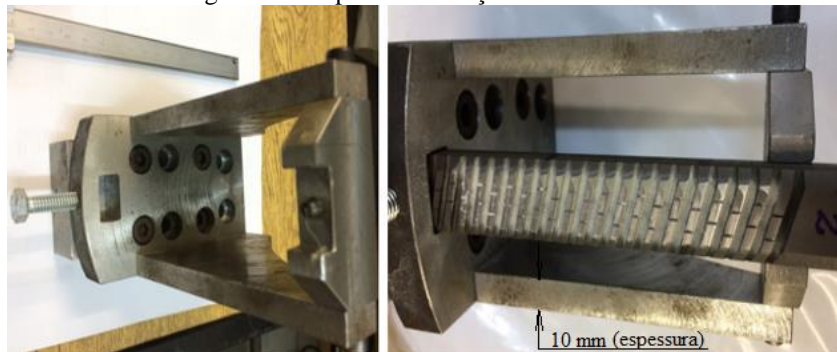
Após a usinagem das peças do suporte conforme os desenhos detalhados na Figura 42 se realizou a montagem e os ajustes juntamente com a ferramenta, conforme Figura 43.

Figura 42 - Desenho dimensionado das peças do suporte.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Suporte e a fixação da ferramenta.



Fonte: Autor.

3.8 CÉLULA DE CARGA

Se realizou a calibração da célula de carga utilizando pesos padrões. A carga máxima utilizada durante a calibração foi de 63,5 kgf (correspondente a 140 lb). Se utilizou 14 pesos padrão de 10 lb cada um.

Os resultados de calibração foram considerados satisfatórios, com ótima linearidade entre o sinal de entrada e o sinal de saída (sinal de saída nominal de boa magnitude).

A célula de carga foi conectada a um sistema de aquisição de dados modelo Spider 8 da HBM (o mesmo utilizado no monitoramento dos esforços de desgaste), se procedeu o zeramento do valor do sinal da célula de carga antes da aplicação de cada ciclo de carregamento e o registro do sinal de saída, em mV/V, procedimento este realizado para cada incremento de força. Ao todo, foram realizados 3 ciclos de carregamento. Foram utilizados os valores médios obtidos nos três ciclos para a construção da curva.

Para analisar a influência dos esforços de corte nas sequências e etapas do desgaste das ferramentas, se instalou uma célula de carga, conectado a um amplificador HBN Spider 8, para medir a força de corte e a sua variação, os resultados obtidos eram enviados a um computador notebook e registrados em um software de medição (Catman), a Figura 44a mostra a célula de carga calibrada para ser instalada no alojamento Figura 44b e a ferramenta atuando sobre o material a ser desgastado.

Figura 44 - a) mostra a célula de carga; b) mostra o local da célula de carga e a ferramenta atuando sobre o material.



Fonte: Autor.

Se adotou o desgaste abrasivo denominado como desgaste de flanco ou de cratera da aresta de corte da ferramenta para definição dos resultados de desgaste. O desgaste da ferramenta se deu pela ação de partículas extras duras do material desgastado. Se determinou o desgaste da ferramenta por perda de massa para isso as ferramentas foram limpas e pesadas

em uma balança de precisão, antes e depois do ensaio. A Figura 45 apresenta as ferramentas desgastadas.

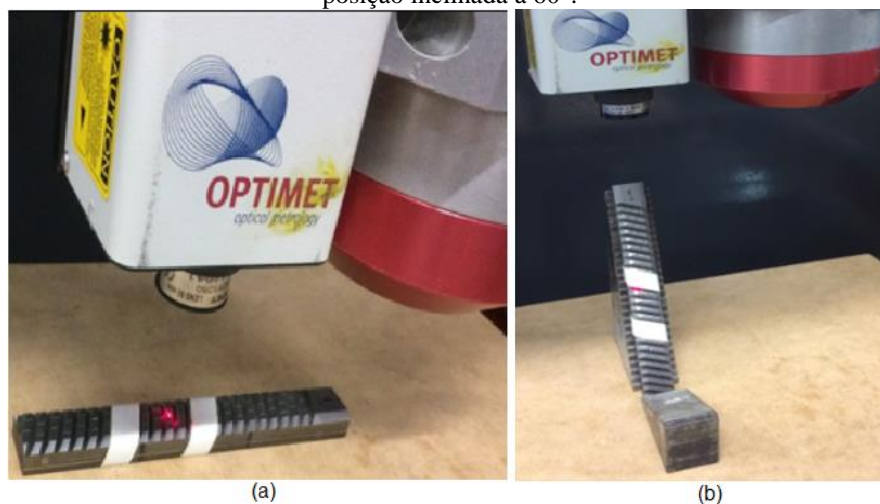
Figura 45 - Ferramentas desgastadas.



Fonte: Autor.

Para obtenção da avaliação qualitativa dos desgastes se realizou a varredura por Digitalização Tridimensional no LDSM-Laboratório de Design e Seleção de Materiais da UFRGS. A Figura 46a: mostra a ferramenta na posição horizontal para realizar a varredura por scanner da superfície do ângulo de incidência de corte dos dentes. A Figura 46b: mostra a ferramenta na posição inclinada à 60° para realizar a varredura por scanner da superfície do ângulo de incidência frontal de corte dos dentes.

Figura 46 - (a) escaneamento com a ferramenta na posição horizontal, (b) escaneamento com a ferramenta na posição inclinada à 60° .



Fonte: Autor.

Após os dados digitalizados por scanner; fase inicial, fase intermediária e na fase final, estes dados foram enviados para o software Geomagic studio para transformar os dados em imagens 3D com superfícies de alta precisão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO DA MÁQUINA DE ENSAIO

Após a montagem, foi realizado a lubrificação e ajustes da máquina, e então, se procedeu a avaliação e considerações dos movimentos individuais de cada sentido ou eixo (X, Y, Z), observando que os movimentos são repetitivos para cada eixo em questão, pois são comandados por engrenagens que completam fração de movimentos intermitentes em ciclos iguais independente do número de golpes por minuto. Para a avaliação do comportamento do equipamento se utilizou o desgaste de duas ferramentas em ciclos iguais e contínuos.

4.1.1 Definição dos parâmetros de corte

Para obtenção dos resultados e definição dos parâmetros de corte se realizou um pré-teste com a máquina para avaliação de comportamento do equipamento, no qual foi usinado um bloco de alumínio com uma ferramenta de aço rápido monocortante utilizando como parâmetros 60 golpes por minuto e avanço de 0,1 mm por golpe, para análise de comportamento da máquina e confirmação dos parâmetros de corte, conforme Figura 47.

Figura 47 - Usinagem para definição dos parâmetros.



Fonte: Autor.

Após se realizou a montagem da ferramenta no suporte e definidos os parâmetros de corte da máquina para início da primeira etapa do desgaste, o material utilizado para desgastar as ferramentas foi um bloco compacto refratário de baixa granulação com dimensão de 50 x 110 x 240 mm de baixa dureza aglutinante, que apresenta bom resultado ao desgaste abrasivo ocasionando o desgaste das ferramentas fixado a mesa da máquina, os parâmetros e procedimentos utilizados foram; profundidade de corte de 0,1 mm, avanço de corte de 0,1 mm, 40 golpes por minuto e um curso de 100 mm, que foi definido baseando-se no movimento durante o processo feito pelo cirurgião considerando que seja realizado em média 20 GPM entre limpeza e cuidados cirúrgico para o alojamento da prótese de femur, para isso tomou-se como média 40 golpes por minuto, pois o objetivo deste é avaliar o comportamento da máquina e o desgaste das ferramentas.

4.1.2 Definição dos resultados

Para definição dos resultados e construção da curva de desgaste definiu-se para cada etapa a sequência de 640 GPM ou seja, 16 minutos em operação de desgaste e 15 sequências totalizando 9600 golpes, sendo feito em duas etapas para cada ferramenta, conforme a Figura 48 e Figura 49, que mostram de modo qualitativo e quantitativo a perda de massa das ferramentas.

Figura 48 - Ferramenta 1- Imagens quantitativa e qualitativa da perda de massa.



Fonte: Autor.

Figura 49 - Ferramenta 2- Imagens quantitativa e qualitativa da perda de massa.



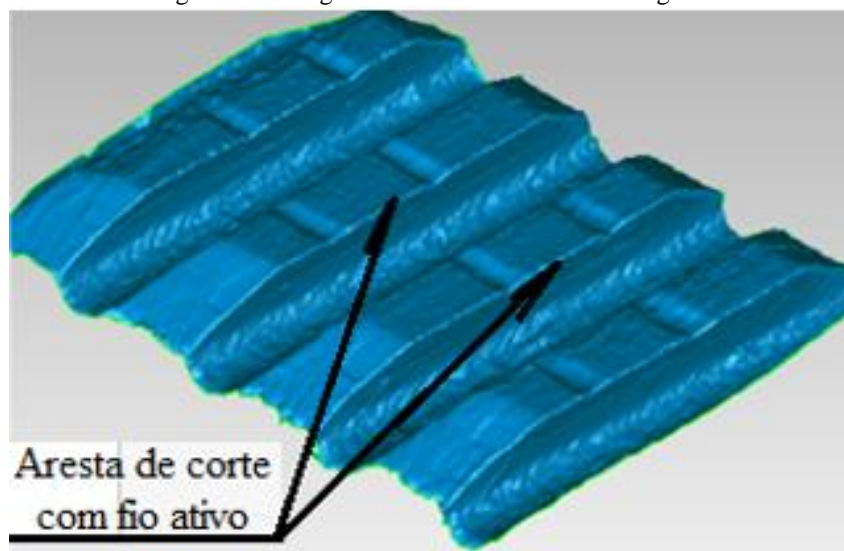
Fonte: Autor.

A perda de massa na ferramenta 1 é da ordem de 1,1% , ao passo que na ferramenta 2 é pouco menor, ficando na ordem de 0,7%.

Considerando que os experimentos correspondem a cerca de 15 intervenções cirúrgicas, se pode entender como satisfatório a análise das ferramentas, com base nos dados obtidos de Lucas, 2018, (LUCAS, et al., 2018) onde é apresentado que após 25 procedimentos cirúrgicos, 4,53% de 552 instrumentos apresentaram bordas danificadas.

Com os dados digitalizados e transformados em imagens 3D, pode-se ter a avaliação qualitativa da aresta cortante da ferramenta como mostra as imagens a seguir. Com o software Geomatic studio 2013 foi obtido a imagem mostrada na Figura 50, que foi obtida antes do início do desgaste, a qual mostra as arestas cortantes com o gume ativo.

Figura 50 - Imagem da ferramenta antes do desgaste.

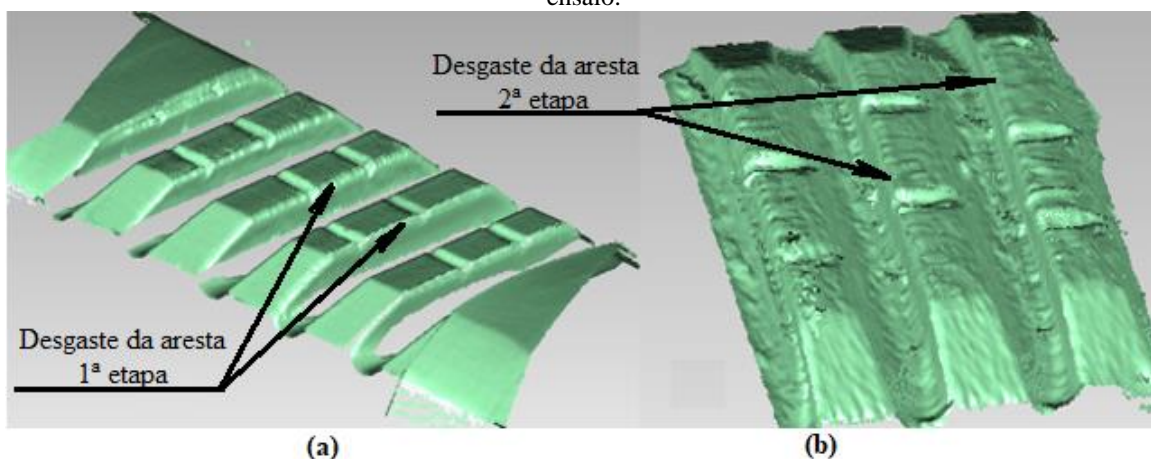


Fonte: Autor.

Observa-se na imagem da Figura 51, as arestas cortantes com o gume desgastado de forma progressiva, isto é, a primeira aresta apresenta maior desgaste que a seguinte, ocasionado pelo fato de que quando uma aresta está atuando a seguinte tem o esforço de corte menor considerando que a primeira aresta impede a total penetração de corte, e assim suscetivamente com as demais arestas de corte na primeira e na segunda etapas do desgaste.

Este é outro fator que pode ser comparado com os dados de Lucas, 2018, pois 1,09% das ferramentas analisadas por ela após 10 intervenções apresentaram ausência de corte.

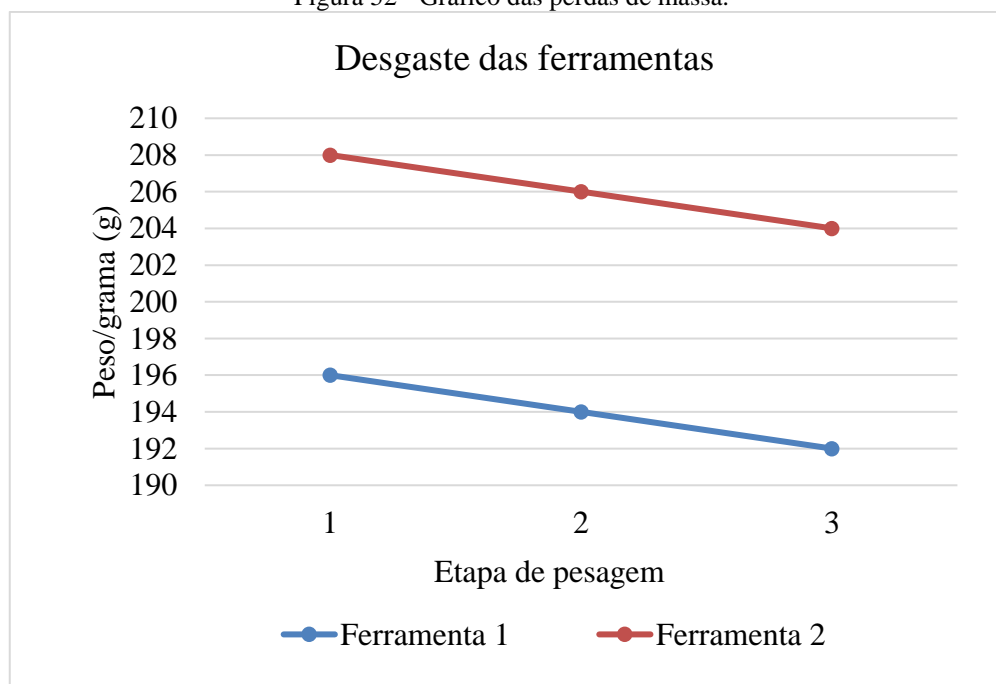
Figura 51 - Imagem (a) desgaste na primeira etapa do ensaio; Imagem (b) desgaste na segunda etapa do ensaio.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 52, apresenta os resultados quantitativos do desgaste obtido através da perda de massa em cada uma das ferramentas com parâmetros iguais de procedimentos conforme mostrados anteriormente.

Figura 52 - Gráfico das perdas de massa.



Fonte: Autor.

O resultado em ambas etapas de desgastes utilizando os mesmos parâmetros da primeira etapa da avaliação e obedecendo os ciclos acima citados resultou na perda de massa de 2 gramas na ferramenta 1 e ferramenta 2 em cada etapa, a obtenção dos valores foram medidos em uma balança de precisão, conforme Tabela 4:

Tabela 4 - Etapas dos ensaios.

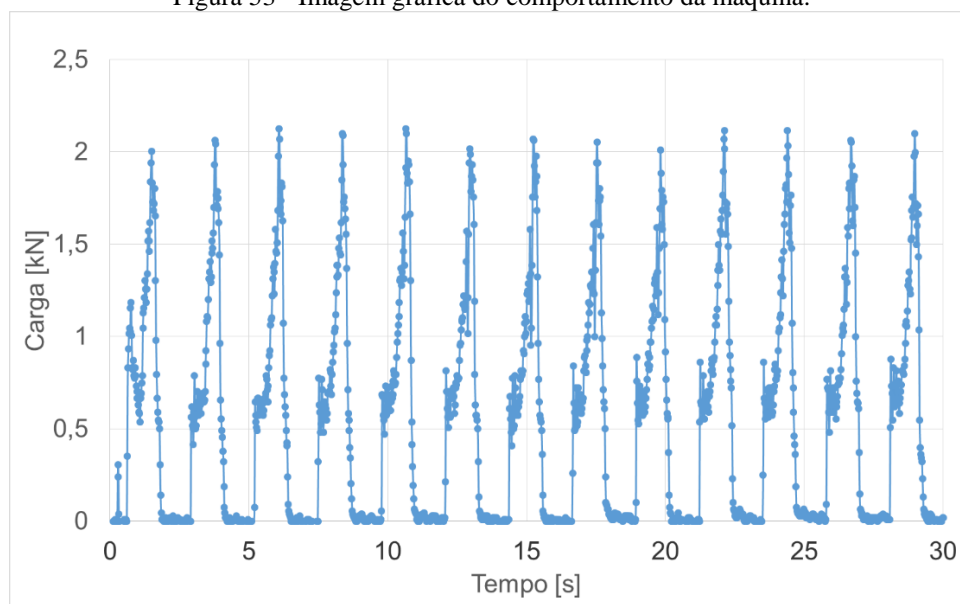
FERRAMENTA	ETAPA	Nº DE GOLPES	TEMPO EM MINUTOS	Nº DE SEQUÊNCIAS	TOTAL DE GOLPES	PERDA DE MASSA
Ferramenta 1	1	40	16	15	9600	2 gramas
Ferramenta 2	1	40	16	15	9600	2 gramas
Ferramenta 1	2	40	16	15	9600	2 gramas
Ferramenta 2	2	40	16	15	9600	2 gramas

Fonte: Autor.

Com a utilização do software Catman, junto a célula de carga instalada a um amplificador HBN Spider 8, foram obtidas curvas de Força *versus* tempo do comportamento da máquina (Figura 53) quanto aos esforços de corte evidenciando a regularidade com o mínimo de oscilação de carga do esforço realizado. Comportamento que se repete no início, meio e fim de cada ciclo.

Estes dados, apesar de satisfatórios do ponto de vista mecânico, podem apresentar inconcistência ao compararmos a máquina com o cirurgião, pois este sofrerá desgaste físico e mental com o transcorrer do procedimento.

Figura 53 - Imagem gráfica do comportamento da máquina.

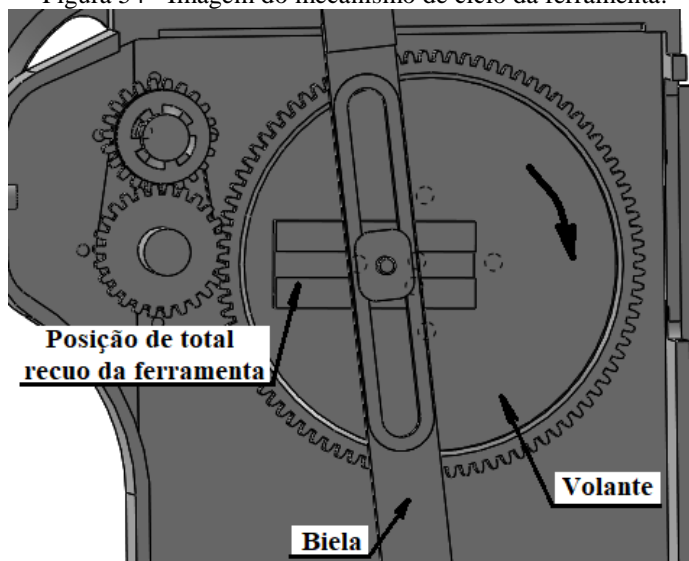


Fonte: Autor.

A Figura 54 demonstra o comportamento da máquina de ensaio em cada ciclo (vai e vem do carro torpedo). Para obtenção deste comportamento utilizou-se um peso morto de

2,930 kg, o qual tem a função de simular o peso da mão do cirurgião e ajuda a evitar a vibração no início do sentido de avanço da ferramenta de corte. Conforme analisado, o volante que conduz a biela, Figura 54, inicia com carga zero conforme o volante gira têm-se o acréscimo de carga de 0,5 KN, nos pontos de 0,5 até 1,0 KN há pequenos pontos de vibração ocasionados pelo esforço de corte, após há a estabilidade até o final do curso da ferramenta com a carga chegando até 2,0 KN e o retorno do torpedo (ferramenta) para início de novo ciclo. Com isto, o gráfico demonstra que a máquina manteve-se estável durante todo o ensaio.

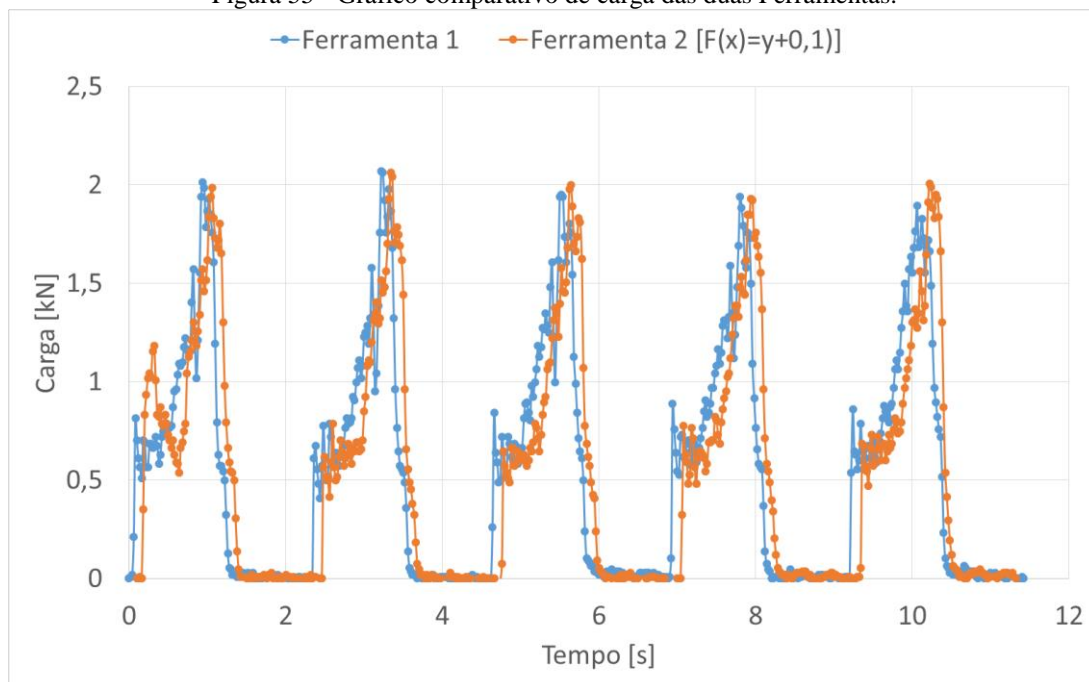
Figura 54 - Imagem do mecanismo de ciclo da ferramenta.



Fonte: Autor.

Como se pode observar, não houve um aumento significativo na força de corte com o aumento do desgaste da aresta de corte, o que demonstra um efeito pouco intenso por parte do atrito no gume principal de corte, para uma profundidade de corte de 0,1 mm, como a aresta principal é inclinada com um ângulo de incidência de 40° , resulta numa profundidade de corte menor (0,077 mm), decréscimo de 23% o que reduz o esforço de corte. Se verificou um comportamento semelhante para cada ciclo de cada etapa em ambas ferramentas, conforme a Figura 55, que mostra as condições para força passiva nas mesmas condições.

Figura 55 - Gráfico comparativo de carga das duas Ferramentas.



Fonte: Autor.

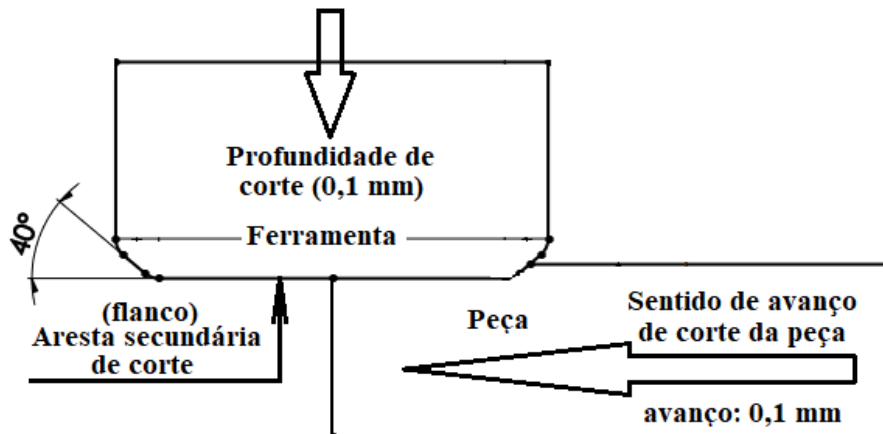
Uma questão que levantou dúvidas foi a do desgaste das ferramentas durante o ensaio e a provável influência sobre a força de corte, ou seja, levantou-se a hipótese de que com o aumento do desgaste da aresta cortante, houve o acréscimo da força de corte e uma redução da profundidade de penetração, devido à progressão do desgaste por atrito nos flancos secundários.

Para tanto, os ensaios foram duplicados, ou seja, ao término da primeira bateria de ensaios, eles foram repetidos com a segunda ferramenta nas mesmas condições que foram realizados com a primeira ferramenta, se observou, comparativamente, como apresentado no gráfico da Figura 55, que não houve variação na força de corte.

4.1.3 Influência do atrito no flanco secundário

Se por um lado o atrito no gume secundário não apresentou uma influência significativa na força total de corte e de avanço, o atrito no flanco secundário se mostrou mais evidente e menos coadjuvante nos esforços de corte. A Figura 56 representa um ensaio para a profundidade de sulco de 0,1 mm, com ferramenta de ângulo de inclinação 40°, o que forma o perfil do dente da ferramenta (brocha).

Figura 56 - Sentido da profundidade de corte e de avanço de corte da peça.

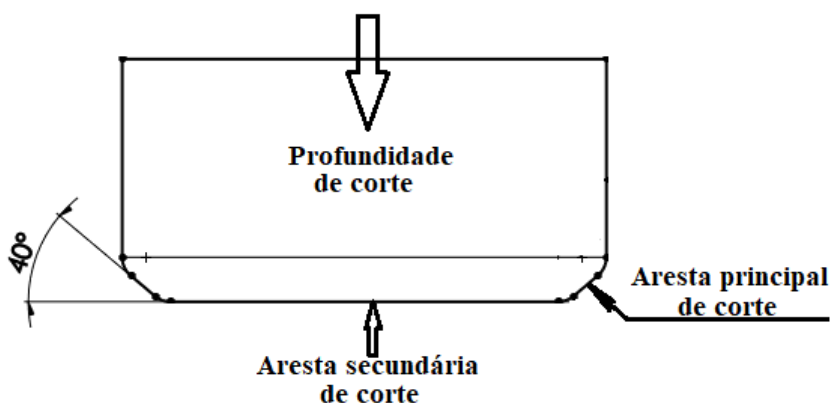


Fonte: Autor.

O atrito no gume secundário se mostrou pouco influente nos ensaios, mantendo uma parcela praticamente constante no total desses esforços de corte. Esse ganho na resistência à passagem da ferramenta com o aumento do comprimento do gume secundário em contato com a peça foi insignificante em relação à ordem da força necessária ao corte do material.

Com um ângulo de inclinação positivo, a influência do atrito no flanco secundário foi minimizado, caracterizando a formação do cavaco em uma seção paralelogrâmica, com área de $0,0077 \text{ mm}^2$. Além disso, há uma redução na força de corte na aresta secundária provocado pela resistência ao corte da aresta principal.

Figura 57 - Seção da ferramenta desgastada.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Ao término da análise dos ensaios, pôde ser feita uma avaliação criteriosa dos resultados, avaliando o alcance dos objetivos e a qualidade dos mesmos, bem como limitações e obstáculos encontrados durante as pesquisas, projeto e a modificação da máquina. A respeito desta, as expectativas esperadas foram atendidas, pois se mostrou eficiente na simulação da operação de desgaste da ferramenta, no controle e precisão do posicionamento e velocidade da ferramenta, bem como na aquisição de dados de força, com a utilização de software de medição chamado de Catman, requisitos para confiabilidade dos ensaios.

De acordo com os resultados obtidos, é possível concluir-se que:

- O projeto da máquina de ensaios de desgaste em instrumento cirúrgico para alojamento da haste femoral da prótese femoral mostra-se eficiente, produzido com baixo custo relativo, atendendo as condições reais de utilização do componente.
- Os resultados apresentados mostraram que o desgaste das arestas foram semelhantes durante todo o processo de avaliação de cada etapa, considerando os mesmos parâmetros para o desgaste.
- É possível validar desgastes de ferramentas cirúrgicas, prevendo sua vida útil e assim elaborando planilhas de manutenção preditivas das mesmas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, observaram-se vários pontos importantes, mas que não foram avaliados por não ser o enfoque principal desta dissertação. A seguir citam-se alguns pontos que podem complementar este trabalho e contribuir em futuros estudos sobre o tema:

- Possibilitar a avaliação de desgaste do Instrumento Cirúrgico Raspa Femoral (RF) com Escamas de diferentes procedências.
- Considerar a possibilidade na mudança dos perfis das PTAQ, viabilizando assim um projeto que possibilite a reafiação do instrumento cirúrgico Raspa Femoral (RF), reduzindo-se os custos das mesmas.
- Considerar a possibilidade de redução do desgaste do instrumento cirúrgico Raspa Femoral com cobertura de TiAlN Nitreto de Titânio Alumínio ou TiCN Carbonitreto de Titânio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCERAM. (2016). Sítio da Associação Brasileira de Cerâmica. *ABCERAM. Sítio da Associação Brasileira de Cerâmica. Disponível em <<http://www.abceram.org.br>>. Acesso em: 1 de março de 2016.*
- ABNT. (2014). NBR 10237. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10237: materiais refratários- Classificação. Rio de Janeiro, 2014.*
- ABNT. (2015). NBR 5017. *Produtos refratários conformados densos - determinação da densidade de massa, porosidade aparente e porosidade real. Rio de Janeiro, 2015.*
- ASM. (1989). Metals Handbook-Machining. *Metals Handbook-Machining. 9. ed. Editora ASM International, 1989. Vol. 16. 1089 p. ASM International.*
- BAUER, J. R. (2007). Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V . *Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes. Tese (Doutorado) . Universidade de São Paulo.*
- BAUMER. (05 de Julho de 2015). *Baumer. Fonte: <http://www.baumer.com.br/baumer/site/download/index.php?acao=download&cod=516&idioma=Portugues>*
- BERGMANN, C. P; BRAGANÇA, S. R. (2004). Microestrutura e propriedades de porcelanas. *BERGMANN, C. P; BRAGANÇA, S. R. Microestrutura e propriedades de porcelanas. Cerâmica, v. 50, p. 291 - 299, 2004.*
- BÓ, M. D. (2007). Cerâmica Industrial. *BÓ, M. D.; BARBETTA, P. A.; HOTZA, D. Utilização de resíduos da indústria de revestimento cerâmicos na fabricação de refratários triaxiais. Cerâmica Industrial, v. 12, p. 42 - 46, 2007.*
- BRANDÃO, L. C. (2006). Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas velocidades de corte. *Estudo experimental da condução de calor no fresamento de materiais endurecidos utilizando altas*

velocidades de corte. 182 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

- BRYSON, W. E. (2015). Selection Of Tool Steel Grades. Em W. E. BRYSON, *Heat-Treating, Master Control Manual* (pp. 191–193.). Munique: Hanser.
- BUSATO, T. S. (05 de Julho de 2015). *Dr. Thiago S. Busato - Cirurgia de quadril*. Fonte: Medicina do Quadril: <http://www.medicinadoquadril.com.br/site/protese/>
- BUSATO, T. S. (03 de Janeiro de 2016). *Dr. Thiago S. Busato - A história da ortopedia*. Fonte: Medicina do Quadril: <http://medicinadoquadril.com.br/site/a-historia-da-ortopedia-e-da-cirurgia-do-quadril/>
- CALLISTER, W. D. (2008). Ciência e engenharia de materiais. *CALLISTER, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008. Rio de Janeiro: LTC.*
- CASIRAGHI, C.; FERRARI, A.; ROBERTSON, J. (2005). Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. *Raman spectroscopy of hydrogenated amorphous carbons. APS, v. 72, n. 8, p. 085401. Physical Review B.*
- CHE, C. (2013). Doped amorphous carbon films prepared by liquid phase electrodeposition. *Doped amorphous carbon films prepared by liquid phase electrodeposition. Open Journal of Synthesis Theory and Applications, v. 3, n. 01, p. 5, 2013. Scientific Research Publishing.*
- CHIAVERINI, V. (2005). Aços e ferros fundidos. *Aços e ferros fundidos. Associação Brasileira, São Paulo, 7ª edição 2005. ABM.*
- COSTA, S. (02 de 2018). *Dr. Sérgio Costa*. Fonte: Sérgio Costa Hortopedia: <http://www.drsergiocosta.com.br/protese-de-quadril.html#.WndyQY6qPIU>
- DINIZ, A. E. (2006). Tecnologia da usinagem dos materiais. *Tecnologia da usinagem dos materiais. 5. Ed. Editora Artliber, São Paulo, 2006. Artliber.*
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. (2006). Tecnologia da usinagem dos materiais. *Tecnologia da usinagem dos materiais. 5. Ed. São Paulo: Artliber.*
- DONACHIE, M. J. (2000). Titanium: a technical guide. *Titanium: a technical guide. [S.l.]: ASM international, 2000. ASM international.*

- DUARTE, A. K. (2005). Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários. *DUARTE, A. K. Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários. 2005. 122f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.*
- FERRARESI, D. (1987). Característica de usinagem dos metais. *Característica de usinagem dos metais*. São Paulo.
- FRANZ, S. e. (2011). Biomaterials. *Immune responses to implants—a review of the implications for the design of immunomodulatory biomaterials. Biomaterials*, v. 32, n. 28, p. 6692–6709. Elsevier.
- FROES, F. (. (2018). Titanium for medical and dental applications—An introduction. Em M. Q. F.H. (SAM) FROES*, *Titanium in Medical and Dental Applications* (pp. 3 - 21). Tacoma: United States.
- FROES, F. H., & QIAN, M. (2018). *Titanium in Medical and Dental Applications*. Reino Unido: Elsevier.
- GEETHA, M. e. (2009). Progress in Materials science. *GEETHA, M. et al. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants—a review. Progress in Materials science, Elsevier*, v. 54, n. 3, p. 397–425. Elsevier.
- GOLD, V. (1983). Pure and Applied Chemistry. *Glossary of terms used in physical organic chemistry. Pure and Applied Chemistry*, v. 55, n. 8, p. 1281–1371.
- GOMES, L. S. (2009). Tribologia de Superfícies Articulares Protéticas. Em E. K. (Org.), *Artroplastia Total do Quadril* (Vol. 1, pp. 25-40). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan SA.
- GONÇALVES, D. A. (2009). Modelagem e simulação de forças no brochamento. *Modelagem e simulação de forças no brochamento. Apresentação de Power Point, Defesa de dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis 2009b.*
- GRILL, A. (2003). Diamond and related materials. *Diamond-like carbon coatings as biocompatible materials*, v. 12; p. 166-170. Elsevier.

- GUIMARÃES, J. L. (2009). *Estudo de Ferramentas de Corte para Novos Materiais*. Porto / Portugal: Relatório do Projecto Final do MIEM - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- HOGMARK, S; OLSSON, M. (2005). ,Friction, Adhesion, Fundamentals, Wear Mechanisms in Metal Cutting. *Hogmark, S., Olsson, M.,Friction, Adhesion, Fundamentals, Wear Mechanisms in Metal Cutting, First International HSS FORUM Conference, Aachen, Germany, Febr. 2005, 13p.*
- HOLZAPFEL, B. M. (2013). Advanced drug delivery reviews. *M. et al. How smart do biomaterials need to be? a translational science and clinical point of view. Advanced drug delivery reviews, Elsevier, v. 65, n. 4, p. 581–603.* Elsevier.
- HSS FORUM. (2005). Broaching. First International HSS FORUM Conference. *HSS Smart Guide – Broaching. First International HSS FORUM Conference, Aachen,.*
- HURTH INFER. (2005). Apostila Técnica sobre Operação de Brochamento. *Apostila Técnica sobre Operação de Brochamento – Hurth Infer Indústria de Máquinas e Ferramentas LTDA, 2005, 16p.*
- INMETRO. (2015). Acesso em 29 de 09 de 2015, disponível em www.inmetro.gov.br: <http://www.inmetro.gov.br/laboratorios/inmetro/lavib.asp?iacao=imprimir>
- ISRAEL, C. L. (2010). *Desenvolvimento de uma máquina para ensaios de desgaste em próteses totais de articulação de quadril*. Tese, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Metalurgia, Porto Alegre.
- JAFARIA, A., DEHGHANI, K., BAHAAADDINI, K., & HATAIE, R. A. (15 de 12 de 2018). Experimental comparison of abrasive and erosive wear characteristics of four wear-resistant steels. *Wear*, pp. 14-26.
- JOST, H. P. (1990). Tribology-origin and future. *Tribology-origin and future, Wear, v.136, pp.1-17.* *Wear*.
- JUEUN LEE, C. L. (25 de 02 de 2018). Parameters affecting mechanical and thermal responses in bone drilling:. *Journal of Biomechanics*, pp. 4-21.

- JUNIOR, V. M. (2009). Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de lodo de estações de tratamento de água. *Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.*
- KATO, K. (2001). MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK. *Wear Mechanisms*”, MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2. CRC Press LLC.
- KOENINGSBERG, F.; TLUSTY, J.; STOETERAU, R. L. (1970). Machine Tool Structures. *Machine Tool Structures. Pergamon Press.*
- KÖNIG, W.;KLOCKE, F. (1997). Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida -Parte 1. *Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida -Parte 1. 1997, 349 p.*
- LONG, M.; RACK, H. J. (1998). Biomaterials. LONG, M.; RACK, H. J. *Titanium alloys in total joint replacement—a materials science perspective. Biomaterials, v. 19, n. 18, p. 1621–1639,.* Elsevier.
- LTDA, T. T., & TRAUMEC. (s.d.). ANVISA. Acesso em 10 de Junho de 2015, disponível em ANVISA: [http://www4.anvisa.gov.br/base/visadoc/REL/REL\[27229-1-2\].PDF](http://www4.anvisa.gov.br/base/visadoc/REL/REL[27229-1-2].PDF)
- LUCAS, T. C., SOUZA, M. X., GUEDES, H. M., BRAGA, E. V., CORDEIRO, T., & MARTINS, D. A. (2018). IDENTIFICAÇÃO DE DETERIORAÇÕES FÍSICAS E QUÍMICAS NOS INSTRUMENTAIS CIRÚRGICOS APÓS REPROCESSAMENTOS. *Revista de Enfermagem do Centro-Oeste Mineiro*, 1 - 8.
- MACHADO, A. R. (2004). Usinagem dos Metais. MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. *Usinagem dos Metais. 5 ed. Uberlândia: Editora: Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Apostila, 2004.* Uberlândia.
- MATSUMOTO, H., & SILVA, A. C. (2007). Influência da Rigidez do Sistema Máquina-Ferramenta-Dispositivos de Fixação-Peça na Operação de Torneamento. *4ºCOBEF-Congresso Brasileiro de engenharia de Fabricação* (pp. 1-8). Estância de São Pedro/SP: em CD-Rom.
- MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. (1996). MELCHIADES, F. G.; QUINTEIRO, E.; BOSCHI, A. O. *A curva de gresificação: parte i. Cerâmica Industrial, v. 01, ago./dez., 1996.*

- MOHIT LAW, Y. A. (2013). Rapid evaluation and optimization of machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 81 - 90.
- MONMA, A. C. (2014). *Disertação (Mestrado em Engenharia. MONMA, A. C. Bancada para ensaios com vistas à modelagem e simulação de forças no brochamento. Florianópolis. 2014, 126 p: . Florianópolis: Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, .*
- MOUSINHO, A. P. (2003). High density plasma chemical vapor deposition of diamond-like carbon films. *High density plasma chemical vapor deposition of diamond-like carbon films. Microelectronics journal*, v. 34, n. 5, p. 627–629,. Elsevier.
- NAKAMURA, T.; OHANA, T. (2013). Diamond and Related Materials. *NAKAMURA, T.; OHANA, T. Photochemical modification of dlc films with oxygen functionalities and their chemical structure control. Diamond and Related Materials*, v. 33, p. 16–19. Elsevier.
- NAMBA, Y. (1992). Science & Technology of Materials. *NAMBA, Y. Attempt to grow diamond phase carbon films from an organic solution. Journal of Vacuum Science & Technology A, AVS: Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing*, v. 10, n. 5, p. 3368–3370, 1992. AVS.
- NJOYA, D. (2012). Effects of some processing factors on technical properties of a clay-based ceramic material. *NJOYA, D; HAJAJI, M; NJOPWOUO, D. Effects of some processing factors on technical properties of a clay-based ceramic material. Applied Clay Science* v. 65 – 66, p. 106 – 113, 2012.
- PARK, J. B.; BRONZINO, J. D. (2002). Biomaterials: Principles and applications. *Biomaterials: Principles and applications [S.1].* erc press.
- PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. (2000). Bauxitas Refratárias. *PASCOAL, C.; PANDOLFELLI, V. C. Bauxitas Refratárias: Composição Química, Fases e Propriedades – Parte II. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000. Universidade Federal de São Carlos.*
- PIPPEL, E. (1999). Microstructure and nanochemistry of carbide precipitates in high speed steel S 6-5-2-5. *Microstructure and nanochemistry of carbide precipitates in high speed steel S 6-5-2-5 Materials Characterization*,.

- QUINTELA, M. A. (2011). Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. *QUINTELA, M. A.; de MELO, T. M. F.; LAGE, I. J.; PANDOLFELLI, V. C.; ROFRIGUES, J. A. Análise da resistência ao choque térmico de refratários contendo carbono. Cerâmica, v. 47, p. 174 - 179, 2011.*
- R.M. KHUSAINOV, A. S. (2017). Study of Deformations Field in the Working Zone of Vertical Milling Machine. *Procedia Engineering, 1069-1074.*
- RAAD, H. J. (2008). Influência das Condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos. *Influência das Condições de mistura e moldagem na permeabilidade de concretos refratários aluminosos. Pós Graduação em Construção Civil - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.*
- REIS, M. C., & ZAVAGLIA, C. A. (Abril de 1999). Projeto e construção de um equipamento para ensaios de desgaste de materiais para uso em próteses ortopédicas. *SBEB - Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, 15, 31-38.*
- REISSIG, L. e. (2004). Scripta Materialia. *Investigation of near surface structure in order to determine process-temperatures during different machining processes of Ti6Al4V. Scripta Materialia, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 121–126. Elsevier.*
- ROBERTSON, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 37, p. 129-281. Elsevier.*
- SEBRAE. (2008). *SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Cerâmica Vermelha. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM, 2008. SEBRAE/ESPM.*
- SINATORA, A. (2005). Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. *Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte, Prova de Erudição. São Paulo.*
- SOBROSA, F. Z. (2014). Dissertação (Mestrado em Engenharia. *SOBROSA, F. Z. Desenvolvimento de materiais cerâmicos refratários com adição da sílica residual proveniente da queima da casca de arroz. 2014. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014. Alegrete, RS: Universidade Federal do Pampa.*
- STOCHERO, N. P. (2015). Dissertação (Mestrado em Engenharia. *STOCHERO, N. P. desenvolvimento de cerâmica refratária com fibra de aço e sílica residual proveniente da queima da casca de arroz. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado em*

- Engenharia*) - Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015. Alegrete, RS: Universidade Federal do Pampa.
- STOETERAU, R. L. (2004). *Introdução ao projeto de Máquinas-Ferramentas modernas*. UFSC.
- SUSKI, C. A. (2004). Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio. *Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica à Frio*”, *Dissertação de mestrado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA*.
- TRENT, E. M. (2000). Metal Cutting 4ed. *Metal Cutting 4ed. Oxford, Butterworth – Heinemann*. Oxford.
- UFRGS. (2014). *Instituto de Física UFRGS*. Acesso em 05 de julho de 2015, disponível em Física Moderna - A descoberta do raios X: http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s01.html
- V. MARTINS, P. R. (2012). StentS de aço inoxidável 316l de diferentes geometrias avaliados por elementos finitos. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*,, 25 - 34.
- V. MARTINS, W. C. (2010). Estudo norteia a estampagem de peças médicas em ligas de níquel-titânio. *Corte & Conformação de Metais* , 36 - 43.
- VASCONCELO, Y. (26 de Janeiro de 2015). Inovações em Aços. *Revista Pesquisa FAPESP*(107). Acesso em 05 de Julho de 2015, disponível em <http://www.pmt.usp.br/Pesquisa%20FAPESP.htm>
- VILLARES., M. (2003). Tipos-de-tratamento-termico e Revenimento. <http://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Vendas-Servicos/Servicos-Solucoes/Tratamento-Termico/Tipos-de-tratamento-termico/Revenimento>.
- WANG, H. e. (1996). Applied physics letters. *Deposition of diamond-like carbon films by electrolysis of methanol solution*. *Applied physics letters*, AIP Publishing, v. 69, n. 8, p. 1074–1076, 1996. AIP Publishing.
- WILLIAMS, J. A. (2005). Wear and wear particles - Some fundamentals. *"Wear and wear particles - Some fundamentals."* *Tribology International* 38(10): 863-870.

YAMAGUCHI, Y. (1990). Tribology of plastic materials. Their characteristic and applications to sliding components. *ELSEVIER - Tribology series*, 1-89.