

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**NATHALIA BUENO F. N. BATISTA
YURI CAMINHA L. C. REIS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LIGAS CU-AL-BE COM E SEM MEMÓRIA
DE FORMA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2019**

**NATHALIA BUENO F. N. BATISTA
YURI CAMINHA L. C. REIS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE LIGAS CU-AL-BE COM E SEM
MEMÓRIA DE FORMA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Tatiane de Campos Chuvás

**RIO DE JANEIRO
2019**

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente a Deus e nossas famílias pelo apoio e compreensão ao longo deste trabalho, principalmente nos momentos de dificuldade para conciliar trabalho, estudo e TCC.

Agradecemos em especial a nossa professora orientadora Tatiane Chuvas pela paciência, orientação, ajuda e suporte dado ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sempre presente e disposta a nos auxiliar em qualquer hora, situação e comprometimento em finalizar este projeto.

Aos alunos de mestrado Brenno Duarte e Rafael Humano, do CEFET RJ e Hiron - IME - RJ, pela orientação e ajuda nos ensaios realizados.

Aos alunos Rafael e Vanderson - UFRJ, pela disponibilização do laboratório MECANON e auxílio na execução dos ensaios DSC.

Aos professores e equipe do CEFET-RJ pelos sete anos de ensino e apoio em nosso crescimento e qualificação profissional e pessoal, sem tal dedicação não chegaríamos ao posto de engenheira e engenheiro.

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais está sempre vinculado ao desafio de trabalhá-los por meio de diferentes processos de fabricação mecânica, como a usinagem, visando aumentar a qualidade dos produtos e otimizar máquinas e ferramentas utilizadas na fabricação dos mesmos. Em particular, as ligas com memória de forma vêm ganhando espaço no mercado, sendo cada vez mais aplicadas industrialmente, o que tem impulsionado o estudo dessa classe de material quando submetido a processo de fabricação. Grande parte do conhecimento adquirido sobre ligas de memória de forma está baseado nas ligas a base de níquel e titânio, utilizadas principalmente para fios e molas, porém esta liga possui alto custo, o que instiga a busca por novas soluções. Como uma alternativa às ligas Ni-Ti tem-se as ligas de Cu-Al-Be. Contudo, pouco ainda se conhece sobre o seu comportamento, principalmente com relação a característica de memória de forma, durante o processo de usinagem. Tal conhecimento é crucial para a sua aplicação em diferentes mercados, visto que o material passaria por processos de fabricação. Sendo assim, este projeto tem como principal objetivo analisar o comportamento de diferentes ligas de Cu-Al-Be, com e sem memória de forma, em operações de torneamento. Foram analisadas: as forças de usinagem resultantes no processo, o desgaste da ferramenta de corte, o cavaco gerado e o acabamento superficial das peças. Os resultados mostraram que as ligas com memória de forma apresentaram maiores valores de força de usinagem, o que exigiria maior potência das máquinas operatrizes. Entretanto, o fator que mais influenciou nos resultados obtidos foi a composição química das ligas, independente das propriedades de memória de forma.

Palavras-chave: Memória de forma, ligas Cu-Al-Be, torneamento, forças de usinagem.

ABSTRACT

The development of new materials is always linked to the challenge of working them through different manufacturing processes, such as machining, aiming to increase the quality of products and optimize machines and tools used in their manufacture. In particular, memory shape alloys have been gaining market space, being increasingly applied industrially, which has driven the study of this class of material when submitted to the manufacturing process. Most of the knowledge gained about shape memory alloys is based on nickel and titanium alloys, mainly used for wires and springs, however this alloy has a high cost, which instigates the search for new solutions. As an alternative to Ni-Ti there are the Cu-Al-Be alloys. However, little is known about its behaviour, especially with respect to the shape memory characteristic during the machining process. Such knowledge is crucial for its application in different markets, since the material would go through manufacturing processes. Thus, this project has as main objective to analyze the behaviour of different Cu-Al-Be alloys, with and without shape memory characteristics, in turning operations. We analyzed: the machining forces resulting in the process, the wear of the cutting tool, the chip generated and the surface finish of the parts. The results showed that the shape memory alloys had higher values of machining force, which would require higher power of the machine tools. However, the factor that most influenced the results obtained was the chemical composition of the alloys, independent of the shape memory properties.

Key words: Shape memory, Cu-Al-Be alloy, turning, machining forces

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Usinagem	4
2.2. Ligas com efeito de memória de forma	16
2.3. Usinagem em ligas com memória de forma	21
3. Materiais e métodos	25
3.1. Materiais	25
3.2. Métodos	26
4. Resultados e Discussão	31
4.1. Ensaios de DSC	31
4.2. Força de usinagem	34
4.3. Estudo do cavaco	38
4.4. Desgaste da ferramenta	40
4.5. Rugosidade	43
5. Conclusões	48
6. Sugestão para trabalhos futuros	50
Referências Bibliográficas	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Operação de torneamento (GROOVER, 2014).....	6
FIGURA 2.2: Torneamento cilindro (GROOVER, 2014).....	6
FIGURA 2.3: Torneamento cônico (GROOVER, 2014).....	7
FIGURA 2.4: a) Torneamento de faceamento, b) Sangramento radial (GROOVER, 2014)	7
FIGURA 2.5: a) Perfilamento axial, b) Perfilamento radial (GROOVER, 2014)	8
FIGURA 2.6: Geometria da ferramenta de corte (MACHADO <i>et al.</i> , 2011).....	11
FIGURA 2.7: Forças de usinagem (FERRARESI, 2000)	13
FIGURA 2.8: Transformação martensítica (WAYMAN, 1998).....	18
FIGURA 2.9: Martensita maclada (fase escura) e austenita (fase clara) em uma liga de CuAl com memória de forma (WAYMAN, 1998).....	18
FIGURA 2.10: Martensita não maclada com porções de austenita retida em uma liga de NiTi (ABSI, 2013)	19
FIGURA 2.11: Transformação de fase (LAGOUDAS, 2008)	19
FIGURA 2.12: Liga com efeito de memória de forma: a) CuAlBe, b) CuAlBe – NiNb (SILVA, 2014)	21
FIGURA 2.13: Desgaste de flanco conforme aumento de velocidade de corte (WEINERT <i>et al.</i> , 2004)	22
FIGURA 2.14: Desgaste de flanco conforme aumento velocidade de corte (WEINERT <i>et al.</i> , 2004)	23
FIGURA 3.1: Amostra utilizada para o processo de torneamento (unidades em mm).....	27
FIGURA 3.2: Inserto utilizado no torneamento	27
FIGURA 3.3: Fluxo para a aquisição de dados.....	28
FIGURA 3.4: Montagem do sistema de aquisição de forças de usinagem: (a) amplificador de sinal, (b) Placa de aquisição de dados e (c) Dinamômetro e peça montada	29

FIGURA 4.1: Gráficos DSC das ligas sem e com memória de forma	33
FIGURA 4.2: Forças de usinagem com avanço de 0,073 mm/rev ; a) Liga CuAlBe2 e b) Liga CuAlBe2 + NiNb	34
FIGURA 4.3: Gráficos de forças de corte média: (a) CuAlBe1, b) CuAlBe2 e (c) CuAlBe2 + NiNb	36
FIGURA 4.4: Pressão específica de corte; a) Ligas sem memória de forma e b) Ligas com memória de forma	37
FIGURA 4.5: Cavacos após usinagem a) Ligas sem memória de forma b) Ligas com memória de forma	38-39
FIGURA 4.6: Cavacos obtidos para avanço de 0,073 mm (aumento 100x): a) com memória de forma e b) sem memória de forma	40
FIGURA 4.7: Desgaste no flanco principal das ferramentas de corte para as ligas: a) 1SMF, b) 2SMF, c) 3SMF, d) 1MF, e) 2MF e f) 3MF.....	41
FIGURA 4.8: Ferramentas de usinagem em vista superior; a) Liga 1SMF, b) Liga 2SMF, c) Liga 3SMF, d) Liga 1MF, e) Liga 2MF e f) Liga 3MF.....	42
FIGURA 4.9: Gráfico de força de corte.....	43
FIGURA 4.10: Gráfico de rugosidade média ; a) Amostras sem memória de forma; b) Amostras com memória de forma	44
FIGURA 4.11: Gráfico de rugosidade máxima: a) Amostras sem memória de forma; b) Amostras com memória de forma	44
FIGURA 4.12: Gráfico de comparação entre força de corte média e rugosidade média: a) Amostras sem memória de forma, b) Amostras com memória de forma.....	46

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: Percentagem em peso dos constituintes fundidos para a obtenção das ligas (SILVA, 2014)	25
TABELA 3.2: Características do inserto utilizado no torneamento.....	27
TABELA 3.3: Parâmetros de usinagem	28
TABELA 4.1: Identificação das ligas	32
TABELA 4.2: Temperatura de mudança de fase das ligas com memória de forma.....	33
TABELA 4.3: Média das forças de usinagem	35
TABELA 4.4: Nível de desgaste de flanco da ferramenta após usinagem	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Área da secção de Corte

A_f - Temperatura Final de Mudança de Fase Austenítica

A_i - Temperatura Inicial de Mudança de Fase Austenítica

d - Diâmetro da Ferramenta

DSC - *Differential Scanning Calorimetry*

f - Avanço

F_{ap} - Força de Apoio

F_c - Força de Corte

F_e - Força Efetiva de Corte

F_f - Força de Avanço

F_p - Força Passiva ou Força de Profundidade

F_t - Força Ativa

F_u - Força de Usinagem

g - Grama

K_s - Pressão Específica de Corte

LMF - Liga de Memória de Forma

m - Metro

M_f - Temperatura Final de Mudança de Fase Martensítica

mg - Miligrama

M_i - Temperatura Inicial de Mudança de Fase Martensítica

Min - Minuto

mm - Milímetro

mW - Megawatt

n - Rotação da Ferramenta

R_a - Rugosidade média

rev - Revolução

R_t - Rugosidade máxima

rpm - Rotação por Minuto

SMA - *Shape Memory Alloy*

V_c - Velocidade de Corte

V_f - Velocidade de Avanço

μm – Micrômetro

Capítulo 1

Introdução

O setor industrial vem evoluindo e alguns componentes mecânicos estão sendo aplicados em condições de carregamento e meio cada vez mais severos, o que impulsiona o desenvolvimento de novos materiais que possuam as propriedades mecânicas necessárias para o bom funcionamento desses componentes. Concomitantemente ao desenvolvimento de novos materiais, surge o desafio de trabalhá-los por meio de diferentes processos de fabricação mecânica com baixo custo e alta produtividade, sem prejudicar seu desempenho em serviço.

Desta maneira, este trabalho pretende estudar as ligas com memória de forma, materiais leves e que possuem propriedade de mudança de fase ao serem submetidos a esforços mecânicos, mudanças de temperatura e diferenciais elétricos. Por ser uma classe de materiais inovadores no mercado, muitos estudos vêm sendo desenvolvidos com o intuito de obter melhores combinações de ligas, com valores agregados mais acessíveis e boas propriedades mecânicas.

Hoje já se tem estudos (LIN, 1999; VELMURUGAN, 2018; WEINERT, 2004) a respeito do comportamento em operações de usinagem de ligas com memória de forma a base de níquel e titânio. Entretanto, essa liga apresenta alto custo, o que gerou a necessidade do desenvolvimento de novas ligas para aumentar as aplicações da memória de forma e entender as principais diferenças em relação a uma liga sem memória de forma de mesma composição. Assim as ligas Cu-Al-Be vem ganhando espaço no mercado e surge uma nova necessidade de compreender como esses materiais se comportam quando submetidos à diferentes processos de fabricação.

As ligas com memória de forma apresentam aplicações em diversos campos, como por exemplo na área offshore em acoplamentos de tubos flexíveis e na área eletroeletrônica em atuadores e sensores. Tais aplicações demandam a combinação de características presentes nas ligas com memória de forma, como maior leveza e resistência. Visto que as aplicações

comerciais dessas ligas vêm crescendo, a necessidade em melhorar a relação custo-benefício incentivou a busca por uma gama maior de ligas com a propriedade de memória de forma. Dessa forma foi descoberto que ligas a base de Cu-Al-Be apresentam a característica de material inteligente e vem sendo uma opção devido ao seu baixo custo de produção e facilidade na sua fabricação (CHUNG *et al.*, 1998; CHEN, 2009). As ligas de Cu-Al-Be são empregadas em atuadores eletromecânicos e em uniões de tubulações de baixas temperaturas visto que apresentam excelente absorção de vibrações devido ao tamanho de grão grosseiro e boa confiabilidade a baixas temperaturas.

Com relação a usinagem, o torneamento é um dos diferentes processos mecânicos que podem ser realizados com o intuito de retirada de material da peça. Desta maneira, o torneamento é um processo que deve possuir boa tolerância dimensional, e recomendado que possua bom acabamento superficial, uma vez que, quanto melhor acabamento, melhores serão os encaixes futuros das peças trabalhadas em seus locais de destino (SILVEIRA, 2011). Devido às novas tecnologias os processos de usinagem ganham tolerâncias cada vez mais precisas, o que acaba evitando retrabalhos e erros de processo que gerariam o descarte do material base.

Quanto as forças de usinagem, pode-se destacar as três principais forças que atuam no processo, força de corte, força de avanço e força passiva. DINIZ *et al.*(2013), discorre a respeito da importância do conhecimento das grandezas de cada uma destas forças, visto que dessa maneira um panorama geral do processo pode ser realizado, baseado nos valores médios de cada uma destas forças obtidas durante o processo de usinagem.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar, comparativamente, o comportamento de ligas Cu-Al-Be com diferentes composições químicas que possuem quando submetidas a processos de usinagem por torneamento. O intuito principal é comparar essas ligas com outras de mesma composição química, mas que não possuem memória de forma. Para isso, foram utilizadas 3 composições diferentes.

Primeiramente, as amostras foram testadas para a verificação das propriedades de memória de forma. Em seguida, as amostras foram torneadas com diferentes avanços. Após a consolidação de todos os dados adquiridos na usinagem: forças de usinagem, características do cavaco, desgaste da ferramenta e acabamento superficial, foi analisado quais foram as principais diferenças entre os materiais sem e com memória de forma, a influência da variação do avanço ao longo da usinagem e a variação na composição química. Assim foi possível analisar quais são as variáveis mais determinantes para o processo de torneamento

dessa classe de materiais e se a característica de memória de forma apresenta grandes variações no comportamento da liga.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Usinagem

O processo de usinagem é por definição um processo mecânico de remoção de material sob a forma de cavaco com o objetivo de modificar a forma da peça com a utilização de uma ferramenta de corte (FERRARESI, 2000). O princípio fundamental deste processo mecânico é baseado na interferência que existe entre a ferramenta de corte e a peça a ser trabalhada, sendo a ferramenta constituída de um material de dureza e resistência muito superior ao do material da peça.

De acordo com DINIZ *et al.* (2013), a usinabilidade pode ser entendida como o grau de dificuldade que um material apresenta ao ser usinado. Normalmente, a usinabilidade é relacionada exclusivamente com a dureza do material da peça e à sua resistência mecânica, assumindo erroneamente que materiais macios possuem boa usinabilidade e materiais duros baixa usinabilidade. Porém, por ser um processo de interação complexa, frequente e intensa, muitas propriedades devem ser analisadas antes da realização da usinagem e muitas são as possíveis variáveis que podem existir no processo para melhorar ou piorar a usinabilidade de certo material. Sendo assim, deve-se observar e analisar diferentes áreas da mecânica, como: resistência dos materiais (dureza, resistência mecânica, ductilidade), termodinâmica (condutividade térmica) e propriedade dos materiais (taxa de encruamento, microestrutura) para poder realizar o processo da melhor maneira possível.

Os processos de usinagem podem ser classificados em dois subgrupos, os que utilizam ferramentas com geometria definida (por exemplo: torneamento, furação e fresamento) e os que não utilizam ferramentas com geometria definida (por exemplo: retificação e os demais processos abrasivos) (ALTINTAS, 2000).

FERRARESI (2000) menciona diversos tipos de operações de usinagem baseadas no mesmo princípio de remoção de material com a utilização de uma ferramenta gerando cavaco, como: torneamento, aplainamento, furação, alargamento (cilíndrico e cônico), rebaixamento, mandrilamento e fresamento.

2.1.1 Torneamento

Considerado um dos diferentes tipos de processo mecânico de usinagem que possui enorme importância na área da engenharia, o torneamento é muito utilizado para a fabricação e montagem de diferentes componentes e peças dentro da área industrial.

Com o decorrer dos anos, o processo de torneamento passou a ser adotado em ampla escala, uma vez que o advento da tecnologia permitiu o desenvolvimento de ferramentas mais resistentes, tornando possível a realização do torneamento em materiais de alta dureza. Além disso, tornou-se possível a realização da operação com uma boa tolerância dimensional, garantindo assim o aumento da procura por este tipo de processo mecânico de usinagem.

Devido a todas as tecnologias empregadas no processo, um aprimoramento constante dos equipamentos vem sendo elaborado e desenvolvido e, atualmente, existem máquinas de torneamento dos mais diversos tamanhos e modelos, com tecnologias de ponta que garantem a automatização do sistema. Sendo assim, empresas e indústrias conseguem garantir maiores precisões em peças e componentes que são desenvolvidos e modificados no dia a dia de suas oficinas (SILVEIRA, 2011).

DEGARMO *et al.* (2003), estimou que somente nos Estados Unidos os gastos gerais com processo de torneamento representavam um valor de aproximadamente 100 bilhões de dólares, o que demonstra tamanha importância do torneamento e o valor agregado que este processo recebeu com o passar dos anos.

O torneamento é baseado em um processo de corte no qual a peça (Figura 2.1) é fixada no eixo do torno (máquina operatriz) que possui movimento rotativo e uma ferramenta de corte, fixada em um suporte do torno, que permite tocar perpendicularmente a peça a ser trabalhada. Tangenciando a peça, a ferramenta é capaz de reduzir seu diâmetro e avançar e recuar sobre o seu comprimento, permitindo diversas configurações e resultados (FERRARESI, 2000).

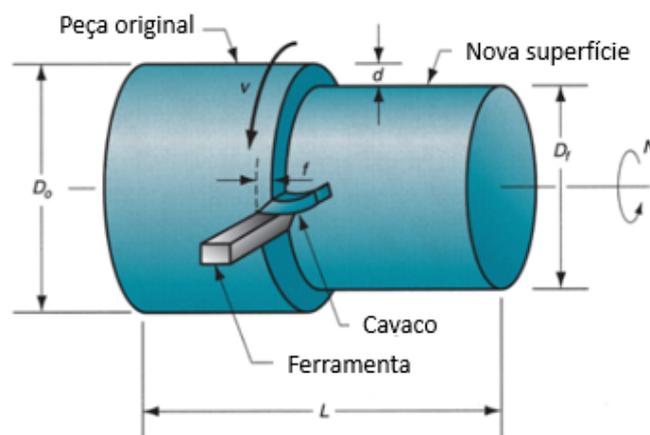


Figura 2.1: Operação de torneamento (GROOVER, 2014)

De acordo com FERRARESI (2000) o torneamento pode ser de dois tipos, torneamento curvilíneo e retilíneo, classificação baseada nas formas de trajetória da ferramenta sobre a peça. No torneamento retilíneo a ferramenta se desloca em uma trajetória retilínea, que pode ser do tipo cilíndrico, cônico, radial e de perfilamento, enquanto que no torneamento curvilíneo o processo de deslocamento da ferramenta ocorre segundo uma trajetória curvilínea. A seguir são apresentadas descrições sobre os tipos de torneamentos:

- Torneamento cilíndrico – Ferramenta se desloca paralelamente ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.2);

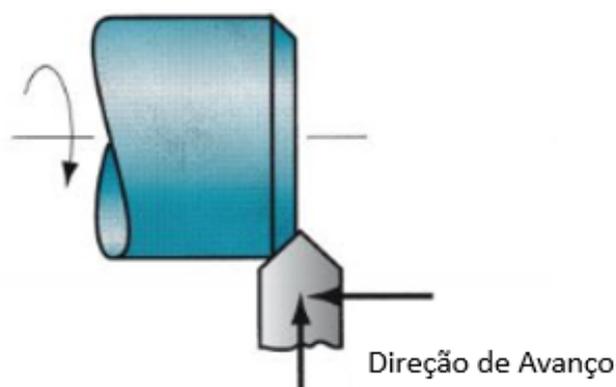


Figura 2.2: Torneamento cilíndrico (GROOVER, 2014)

- Torneamento cônico – Pode ser um processo externo ou interno à peça no qual a ferramenta se desloca em uma trajetória inclinada em relação ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.3);

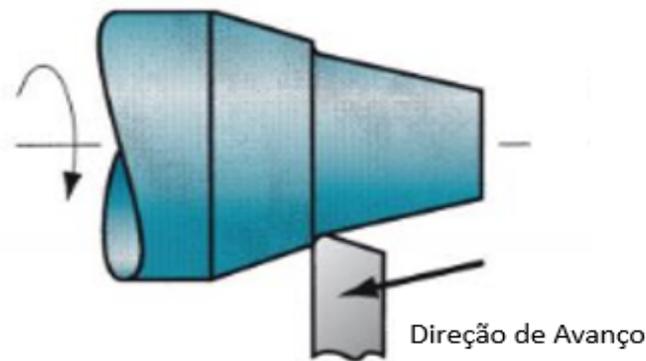


Figura 2.3: Torneamento cônico (GROOVER, 2014)

- Torneamento radial – Ferramenta se desloca em uma trajetória perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina. Quando se deseja obter uma superfície plana, chama-se torneamento de faceamento. Quando o processo de torneamento radial visa à obtenção de um entalhe circular, o torneamento é chamado de sangramento radial (Figura 2.4)

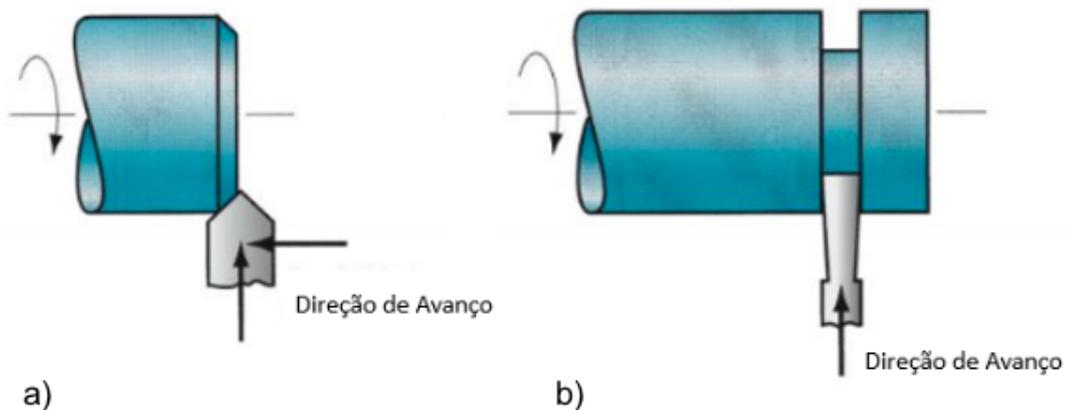


Figura 2.4: a) Torneamento de faceamento, b) Sangramento radial (GROOVER, 2014)

- Perfilamento – Ferramenta com perfil definido e formato particular que se desloca em uma trajetória radial ou axial em relação ao eixo principal de rotação da máquina (Figura 2.5);

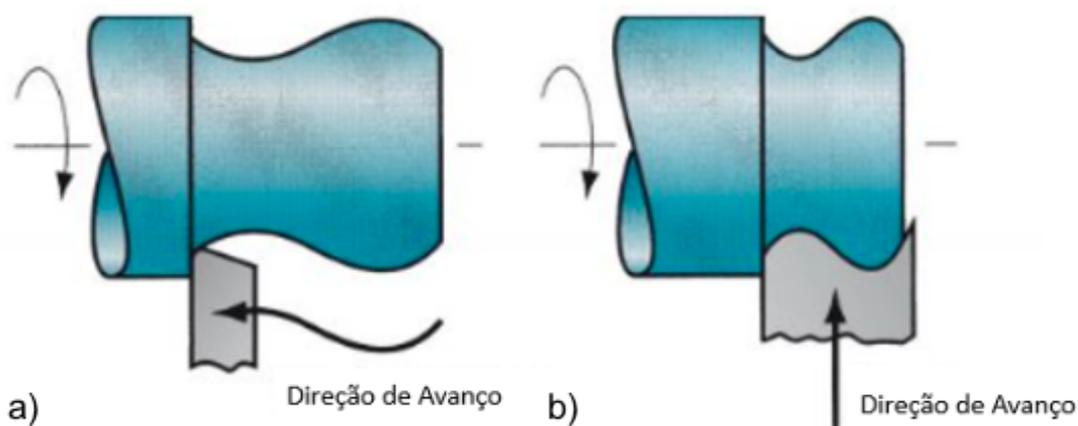


Figura 2.5: a) Perfilamento axial, b) Perfilamento radial (GROOVER, 2014)

FERRARESI (2000) menciona a existência de uma segunda classificação de acordo com a finalidade do processo de torneamento, que pode ser de desbaste e/ou acabamento. Quando realizada a operação de torneamento de desbaste o objetivo principal é realizar alguma modificação grosseira no dimensional da peça. Já o torneamento de acabamento, tem por objetivo principal obter dimensões finais na peça, podendo ser considerada uma última etapa do processo.

2.1.1.1 Parâmetros e movimentos de corte

DINIZ *et al.* (2013), confronta os movimento de corte como os responsáveis pela ocorrência do processo de torneamento, visto que sem estes, o processo não é capaz de ocorrer. Além disso, por convenção é estabelecido que a peça esteja sempre parada (apenas rotaciona) enquanto que a ferramenta realiza os movimentos necessários para ocorrência do processo. Desta maneira, é possível que sinais algébricos sejam usados para definição dos movimentos realizados pela ferramenta, uma vez que, a peça pode ser usada como referência para o sistema.

SILVEIRA (2011) menciona três características intrínsecas relacionadas aos parâmetros e movimentos de corte do processo de torneamento. Primeiramente que o corte geralmente é contínuo, ou seja, procura-se realizar a operação de corte sem interrupções, que caso ocorram, podem gerar defeitos na peça final ou problemas na ferramenta de corte. Em segundo lugar, cita que o corte pode ser descrito em coordenadas cilíndricas, maneira usada

para descrever o caminho que a ferramenta deve seguir durante o processo. E por último, relata que os movimentos da peça (rotação) e da ferramenta (translação) ocorrem simultaneamente.

Tendo em vista que o corte é o principal fenômeno do processo de torneamento, DINIZ *et al.* (2013), descreve dois parâmetros essenciais para a ocorrência do processo, a velocidade de corte e a velocidade de avanço. A velocidade de corte no processo de torneamento é definida como a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. Enquanto que a velocidade de avanço é definida como o produto entre o avanço pela rotação da ferramenta, ambos calculados e estabelecidos antes da realização do processo de torneamento.

O cálculo da velocidade de avanço pode ser realizado através da equação a seguir:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde: V_c = velocidade de corte (m/min)

d = diâmetro da ferramenta (mm)

n = rotação da ferramenta (rpm)

Para o cálculo da velocidade de avanço, usa-se a equação a seguir:

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde: f = avanço (mm/volta)

V_f = velocidade de avanço (mm/min)

Ambos os parâmetros são responsáveis e influenciam a formação do cavaco, que representa toda a interação existente entre peça e ferramenta. Por representar uma interação complexa e dinâmica, a maneira pela qual o cavaco é formado afeta as tensões sofridas pela peça, que, conseqüentemente, determinam as tensões residuais na superfície usinada, as temperaturas, as forças, a vida da ferramenta e as vibrações que são peculiares ao processo de torneamento.

Com referência a importância dos fatores preestabelecidos para a realização do processo de torneamento, a velocidade de corte tem uma grande influência no resultado final

da operação. Por ser uma grandeza vetorial que é responsável pela interação entre a peça e a ferramenta de corte, seu módulo é primordial para o resultado obtido no processo. Para processos convencionais de usinagem, quanto maior o valor da velocidade de corte, teoricamente maior será o calor gerado no processo e pior será o acabamento da operação.

Para que seja possível a aplicação dos parâmetros de corte mencionados, DINIZ *et al.* (2013), descreve alguns movimentos que são essenciais para que a interação peça vs. ferramenta ocorra. Classificados em dois grupos, movimentos ativos e movimentos passivos, definem seis diferentes tipos de movimentos de usinagem. Os movimentos ativos são aqueles que quando ocorrem, proporcionam a remoção de material, são eles:

- Movimento de corte – ocorre entre a peça e a ferramenta, e caso ocorra independente do movimento de avanço, apenas ocorrerá a remoção do cavaco em uma única rotação ou um curso da ferramenta.
- Movimento de avanço – como o movimento de corte, ocorre entre a peça e a ferramenta e ocorrendo simultaneamente com o movimento de corte permite a remoção contínua do cavaco durante várias rotações ou cursos da ferramenta.
- Movimento efetivo de corte – representa a combinação dos dois movimentos de corte e avanço quando o avanço é contínuo. Caso o movimento de avanço seja intermitente, o movimento efetivo é o próprio movimento de corte.

Já os movimentos passivos são aqueles que quando ocorrem, não proporcionam diretamente a remoção de material. São eles:

- Movimento de ajuste – ocorre entre a peça e a ferramenta como todos já mencionados acima e predetermina a espessura da camada de material que será removida com a realização do processo de torneamento;
- Movimento de correção – é executado para compensar as alterações de posicionamento que podem vir a ocorrer entre a peça e a ferramenta devido a alguns fatores, como: desgaste da ferramenta, variações térmicas, deformações plásticas, entre outros que podem vir a ocorrer durante o processo;
- Movimento de aproximação – realizado antes do início do processo para aproximar a ferramenta de trabalho à peça;
- Movimento de recuo – realizado ao final do processo para afastar a ferramenta da peça.

2.1.1.2 Ferramenta de Corte

A ferramenta de corte é um elemento fundamental do processo de torneamento, visto que é o elemento responsável pela retirada do material da peça em forma de cavaco. DINIZ *et al.* (2013), apresenta diferentes partes de uma ferramenta de corte (Figura 2.6), por exemplo: cunha de corte, superfície de saída, superfície principal de folga, superfície secundária de folga, aresta principal de corte, aresta secundária de corte e a ponta de corte. Cada constituinte possui sua particularidade e para cada peça um estudo deve ser realizado para garantir a definição das melhores geometrias possíveis da ferramenta e conseqüentemente os melhores resultados do processo de torneamento.

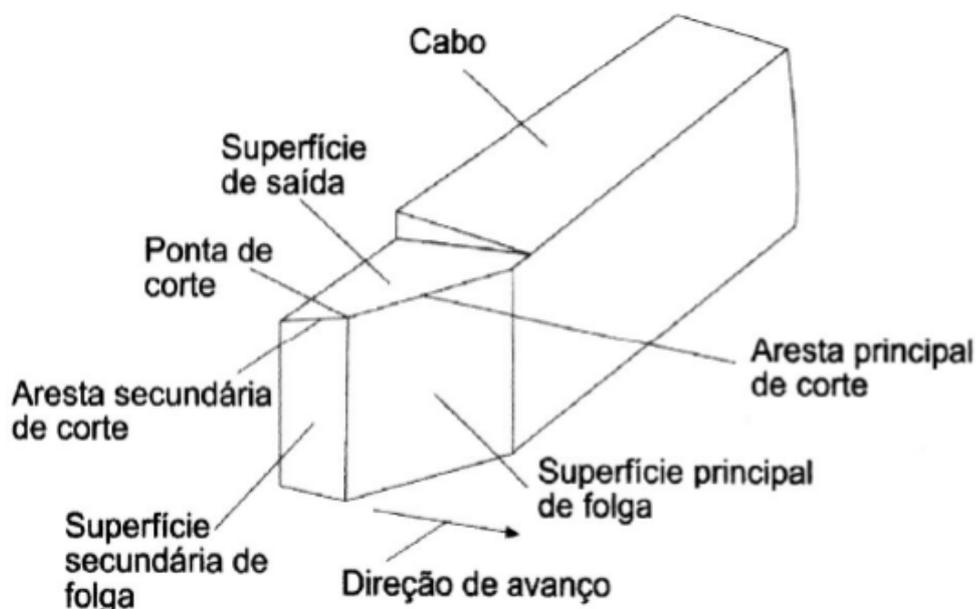


Figura 2.6: Geometria da ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2011)

Como já mencionado no item 2.1.1.1., a complexidade da interação ferramenta vs peça faz com que muitos fatores devam ser analisados antes da realização do torneamento. Tais particularidades são necessárias, pois para cada tipo de material, acabamento e geometria da peça, deve-se otimizar a configuração de fatores a fim de garantir o melhor trabalho possível. Sendo assim, uma escolha ideal da geometria das ferramentas influenciará diretamente na formação do cavaco, no fluxo de saída do cavaco, nas forças de usinagem, no desgaste da ferramenta e na qualidade final do trabalho (DINIZ *et al.*, 2013).

Ao tratar das ferramentas de corte utilizadas nos processos de torneamento e usinagem no geral, deve-se atentar ao fenômeno do desgaste, que está presente em qualquer interação de contato direto entre dois elementos que sofrem algum tipo de atrito dinâmico. De acordo com YULIAN *et al.* (2010), toda ferramenta possui uma vida útil que é completamente atrelada ao desgaste que a ferramenta sofre no decorrer do seu uso. Sendo assim, toda ferramenta ao atingir sua vida útil deve ser reafiada ou substituída por uma nova antes que a aresta de corte da mesma não seja mais capaz de produzir uma superfície com rugosidade e tolerâncias dentro do especificado.

DINIZ *et al.* (2013), define desgaste como a perda contínua e microscópica de partículas da ferramenta devido à ação do corte, com exceção do lascamento, que também é considerado um desgaste, porém ocorre quando partículas maiores são retiradas subitamente. São diversos os tipos de desgastes e avarias que podem vir a ocorrer com as ferramentas de corte, por exemplo: desgaste frontal ou de flanco, de entalhe, de cratera, deformação plástica da aresta de corte, lascamento, trincas e quebra. Analisando de maneira genérica, a relação “velocidade de corte vs temperatura” é crucial para a definição da vida útil de uma ferramenta, visto que dependendo dos valores estabelecidos para a velocidade de corte, uma temperatura de trabalho mais alta ou mais baixa será atingida durante o processo e consequentemente, um maior ou menor desgaste ocorrerá na ferramenta de trabalho.

Além dos parâmetros mencionados acima, existem alguns mecanismos causadores do desgaste das ferramentas, como: aresta postiça de corte, abrasão mecânica, aderência, difusão e oxidação. Por ser uma interação complexa com diferentes tipos de materiais, geometrias e parâmetros de corte utilizados, torna-se onerosa a separação quantitativa da contribuição de cada um desses fenômenos para a formação do desgaste. Contudo, DINIZ *et al.* (2013) após realizar uma análise qualitativa a respeito dos possíveis fenômenos de desgaste, afirma que nas velocidades baixas, o desgaste é relativamente elevado devido ao cisalhamento da aresta postiça de corte e da aderência. Entretanto, em torneamento com altas velocidades de corte, o desgaste é causado principalmente com fatores que são relacionados a temperaturas mais elevadas, como: abrasão mecânica, difusão e a oxidação.

2.1.1.3 Forças de Usinagem

De acordo com DINIZ *et al.* (2013), é de suma importância o conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte presentes nos processos de

usinagem, visto que, eles interferem na potência necessária para o corte (fator utilizado para o dimensionamento do motor da máquina operatriz), a capacidade de atingir tolerâncias dimensionais apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta.

Sendo as forças de usinagem consideradas como uma ação da peça sobre a ferramenta, adota-se um conjunto de equações para determinação das diferentes forças que agem sobre o processo. DINIZ *et al.* (2013), além de citar as equações, relaciona alguns aspectos particulares que possuem influência durante a interação ferramenta *vs* peça, como: influência do material da peça e do material e geometria da ferramenta que estão relacionados ao assunto de pressão específica de corte que será abordado a seguir.

Assumindo que a força total resultante de usinagem que atua sobre a cunha de corte durante o processo é chamada de força de usinagem (F_u) (Figura 2.7), da qual nem a direção nem o sentido são conhecidos, torna-se impossível medi-la e conseqüentemente analisá-la quanto às influências de diferentes parâmetros no seu valor. Desta maneira, procura-se trabalhar sempre com as componentes da força de usinagem, que são obtidas na direção dos eixos do sistema de referência (SILVEIRA, 2011).

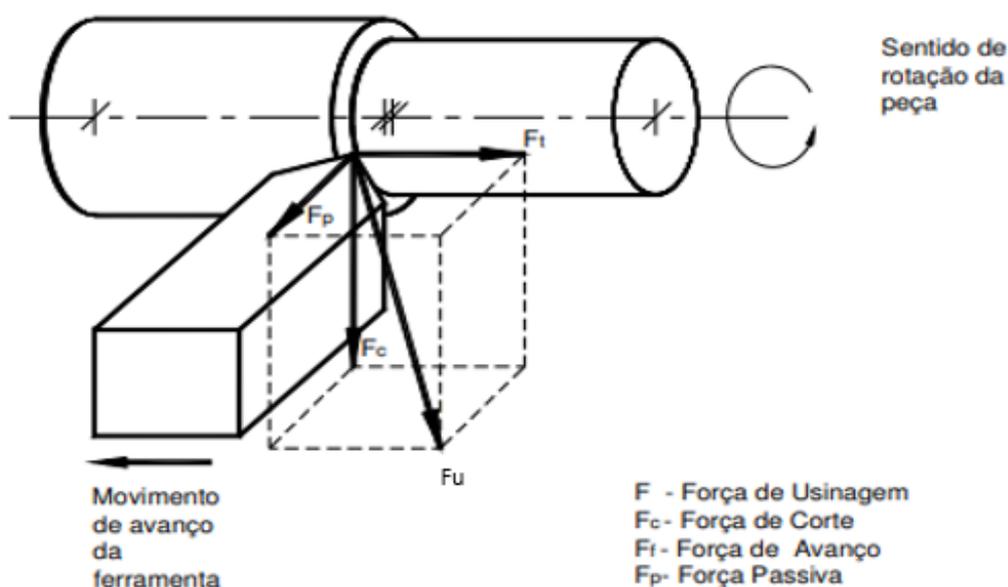


Figura 2.7: Forças de usinagem (FERRARESI, 2000)

DINIZ *et al.* (2013), descreve a decomposição da força de usinagem de acordo com a Norma DIN 6584, em uma força ativa (F_t) que é decomposta em uma componente que está no

plano de trabalho e em uma força passiva ou de profundidade (F_p) que é perpendicular ao plano de trabalho.

Quanto a força ativa, esta por sua vez é decomposta em diversas outras forças que contribuem para a potência de usinagem, uma vez que estão localizadas no plano de trabalho. Por exemplo: força de corte (F_c), força de avanço (F_f), força de apoio (F_{ap}) e a força efetiva de corte (F_e). Sendo assim, têm-se as equações abaixo:

$$F_t = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2} \quad \text{Equação 2.3}$$

$$F_{ap} = \sqrt{F_t^2 - F_f^2} \quad \text{Equação 2.4}$$

Em particular quando o ângulo de avanço $\varphi = 90^\circ$, sendo este o ângulo entre a direção de corte e a direção de avanço, têm-se:

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} \quad \text{Equação 2.5}$$

$$F_c = \sqrt{F_t^2 - F_f^2} \quad \text{Equação 2.6}$$

Com relação a força passiva ou de profundidade (F_p), a qual não contribui para a potência de usinagem, uma vez que é perpendicular ao plano de trabalho, deve-se atentar ao estudo do seu comportamento e do seu valor, pois esta força é responsável pela deflexão elástica da peça e da ferramenta durante o processo de corte. Sendo assim, esta força é responsável pela dificuldade que existe para obtenção de tolerâncias dimensionais e de forma na peça final.

Desta maneira, pode-se estabelecer uma relação entre as forças de usinagem, ativa e passiva utilizando a equação abaixo:

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_f^2} \quad \text{Equação 2.7}$$

DINIZ *et al.* (2013), ao relacionar as forças de corte com as condições de trabalho apresenta a seguinte equação:

$$F_c = K_s \cdot A \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde: K_s = pressão específica de corte

A = área da secção de corte

Sendo a operação de usinagem o torneamento, a área da seção de corte A é calculada através da equação 2.9:

$$A = A_p \cdot f \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde: A_p = profundidade de corte

f = avanço

A partir do conceito de pressão específica de corte visto acima, DINIZ *et al.* (2013) relaciona aspectos particulares que influenciam na interação ferramenta *vs* peça. Por exemplo no caso de uma peça que possui um material de dureza muito elevada, exige uma maior pressão específica de corte para que possa ocorrer o cisalhamento do material na forma de cavaco. Já em relação ao material da ferramenta, afirma que diferentes tipos de materiais podem influenciar na variação do coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, o que implicaria em diferentes valores de pressões específicas de corte.

2.1.1.4 Integridade Superficial

Muitas são as possíveis tecnologias que podem ser utilizadas durante as operações mecânicas (torneamento, fresamento, etc.) porém devido ao alto nível de contato e atrito entre os elementos envolvidos (ferramenta *vs* peça *vs* cavaco), mostra-se importante e relevante a tratativa do termo integridade superficial, uma vez que a interação que ocorre no processo altera as superfícies da peça (alterações de acabamento) e as camadas internas da peça (alterações subsuperficiais) (GRZESIK, 2008; MACHADO *et al.*, 2011).

MACHADO *et al.* (2011), ao tratar das superfícies de peças usinadas, menciona que as interações do processo que envolvem deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e até reações químicas em alguns casos, podem ter diferentes efeitos na superfície dos materiais

De acordo com MACHADO *et al.* (2011), o estudo da integridade superficial de uma peça que passou por algum processo mecânico é de suma importância, pois será a partir desta análise que possíveis falhas podem ser evitadas. FIELD *et al.* (1972), recomenda alguns dados para a avaliação da integridade superficial, como: textura superficial (ondulações e rugosidade), análise macroestrutural e microestrutural e por fim uma análise da microdureza da peça.

GROOVER (2014) e MACHADO *et al.* (2011), tratam sobre os diferentes fatores que afetam a rugosidade de uma superfície usinada, como: geometria da ferramenta de corte, material usinado, vibração e condição da máquina-operatriz, além dos parâmetros de usinagem. Assim, é possível obter equações que visam estimar os valores de rugosidade teórica para os principais processo de usinagem com geometria de corte definida (torneamento e fresamento). A Equação 2.10 apresenta a rugosidade média (R_a) teórica para operações de torneamento, que leva em consideração o raio da ponta da ferramenta e o avanço.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_e} \cdot 1000 \quad \text{Equação 2.10}$$

Já para calcular a rugosidade total (R_t) teórica da superfície acabada, utiliza-se a Equação 2.11, que também leva em consideração o avanço e o raio da ponta da ferramenta.

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \cdot 1000 \quad \text{Equação 2.11}$$

Vale ressaltar a importância deste tópico de integridade superficial para este trabalho, visto que por tratar de usinagem de materiais com ligas de memória de forma, pode ser que durante os experimentos, devido ao calor gerado no processo de usinagem, ocorra mudança microestrutural das amostras que podem vir a prejudicar a geometria da peça usinada.

2.2 Ligas com efeito de memória de forma

De forma simplificada, as ligas que fazem parte da gama dos materiais inteligentes alteram a sua forma através de estímulos mecânicos, térmicos ou campos elétricos, ou seja,

através de um estímulo externo a liga modifica a sua forma física decorrente de transformações em sua estrutura. As ligas com memória de forma (LMF) tem essa característica devido a transformação não difusa de fases metalúrgicas, onde a microestrutura da liga varia entre as fases ditas martensítica e austenítica (FREMOND & MYAZAKI, 1996).

As ligas com memória de forma vêm cada vez mais ganhando espaço no mercado e se tornando fonte de estudos para ampliar a sua aplicação. Também chamados de SMA (*shape memory alloy*), as ligas de memória de forma são utilizadas em sensores, atuadores, *stent*, aparelhos ortodônticos entre outras aplicações. Contudo, a maior gama de uso e estudo dos SMA é na área de fios e molas. Desenvolvido nos anos 60 nos Estados Unidos as ligas com memória de forma eram ligas de Ni-Ti conhecidas como Nitinol e tiveram aplicações na construção de aviões, como por exemplo nos fios inseridos na parte superior e inferior dos *flaps* das asas. Hoje as principais ligas de memória de forma são as ligas a base de cobre – CuAlZn, CuSn e CuSnSi – e a base de níquel – NiTi, NiTiHf, NiTiPd e NiMnGa, tendo muitas vezes a adição de ferro e cromo para redução da temperatura de transformação (SHAW, 1995). Outro ponto é que essas ligas além da performance de memória de forma apresentam boa resistência mecânica e resistência a corrosão.

As LMF apresentam a microestrutura martensítica (denominada fase produto) a baixas temperaturas e a fase austenítica (denominada fase de origem), sendo a fase que apresenta estrutura cristalina cúbica altamente simétrica e a fase estável a temperaturas elevadas (LAGOUDAS, 2008). As transformações de fase para as ligas com memória de forma ocorrem a temperaturas mais baixas do que para as ligas sem essa características; tais temperaturas podem ser definidas experimentalmente (através de ensaios de calorimetria), podendo variar de acordo com a composição química e processos mecânicos em que a liga foi submetida. A transformação de fase ocorre através do cisalhamento dos planos cristalográficos, sendo então uma transformação não difusa. Tal transformação ocorre de forma semelhante nos aços ao serem submetidos a mudanças bruscas de temperatura como no tratamento de têmpera, sendo a grande diferença entre os aços e os SMA o fato das ligas com memória de forma sofrerem uma transformação termoelástica, e então reversível (KENNEDY, 1987). A fase martensítica apresenta duas organizações (Figura 2.8), a martensita maclada (Figura 2.9) e a martensita reorientada, também conhecida como martensita não maclada (Figura 2.10), onde apesar de apresentarem a mesma estrutura cristalina têm orientações diferentes. Obtêm-se a martensita maclada através da variação de temperatura, já a martensita reorientada é induzida por tensão (CASTILHO & SILVA, 2011).

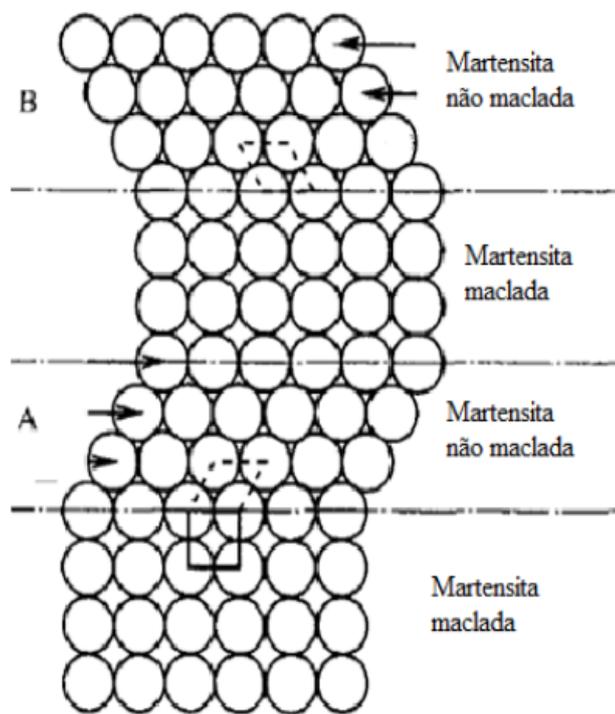


Figura 2.8: Transformação martensítica (WAYMAN, 1998)

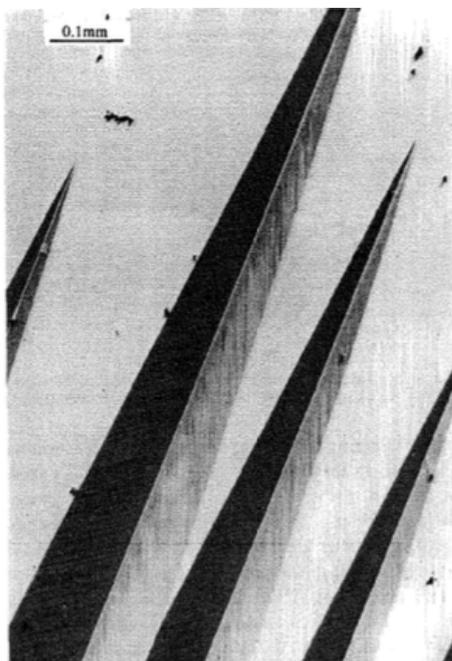


Figura 2.9: Martensita maclada (fase escura) e austenita (fase clara) em uma liga de CuAl com memória de forma (WAYMAN, 1998)



Figura 2.10: Martensita não maclada com porções de austenita retida em uma liga de NiTi (ABSI, 2013)

De acordo com LAGOUDAS (2008) a mudança de fase reversível entre austenita e martensita e vice e versa é a base para o comportamento dos SMA, ocorrendo a alteração da forma da liga através das alterações de fase conforme o seu aquecimento e resfriamento. Para essas transformações existem quatro temperaturas características (Figura 2.11): a liga começa a transformação para a martensita maclada através de um estímulo externo na temperatura M_i e termina a sua transformação na temperatura M_f . Durante o aquecimento tem-se a temperatura de início de transformação A_i e após a formação completa da austenita tem-se a temperatura final A_f .

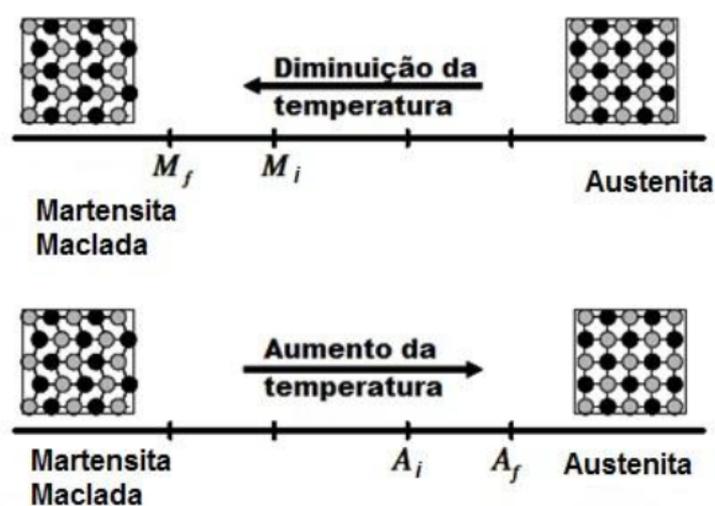


Figura 2.11: Transformação de fase (LAGOUDAS, 2008)

Na fase de martensita maclada, com a aplicação de uma carga e estando abaixo da temperatura M_i , é possível reorientar os cristais, e após a retirada da carga ocorre uma mudança macroscópica no material sendo essa uma das principais características das ligas com memória de forma visto que essa alteração atômica não ocorre por difusão.

De forma geral, as ligas com memória de forma deformam-se plasticamente com grande facilidade, ao estarem abaixo da temperatura M_f e, ao sofrerem uma deformação plástica, irão retornar ao estado inicial ao serem aquecidas a uma temperatura acima de A_f . Ao recuperar a forma física inicial após a retirada de uma carga, estando a liga em temperatura acima de A_f pode-se dizer que a liga apresenta características pseudoelásticas (SILVA, 2011). Ao resfriar e retornar ao seu estado físico inicial a liga está pronta para novas deformações. Devido ao objetivo do presente trabalho ser entender o comportamento mecânico das ligas com memória de forma, não é abordado a fundo a área metalográfica e análises de mudança de fase microestrutural.

2.2.1 Ligas com memória de forma a base de cobre e alumínio

As ligas de cobre e alumínio apresentam em geral um baixo custo em relação as ligas a base de níquel e titânio e por isso tem sido mais atrativas, mas são muito frágeis, o que limita sua aplicação no setor industrial. Contudo, com a adição de elementos de liga como o níquel e o berílio é possível melhorar suas propriedades, além de existir a possibilidade das mesmas tornarem-se ligas com memória de forma com tratamentos térmicos como por exemplo a têmpera.

O níquel é o elemento mais comum para ser adicionado visando alcançar as propriedades específicas de projeto. Entretanto, a fragilidade mecânica da liga ainda pode existir; outro ponto desfavorável é o alto custo das adições de níquel. A adição de outros elementos de liga junto ao níquel, como por exemplo o nióbio, atuam como refinadores de grãos (Figura 2.12) aumentando a tenacidade da liga (ALBUQUERQUE, 2010).

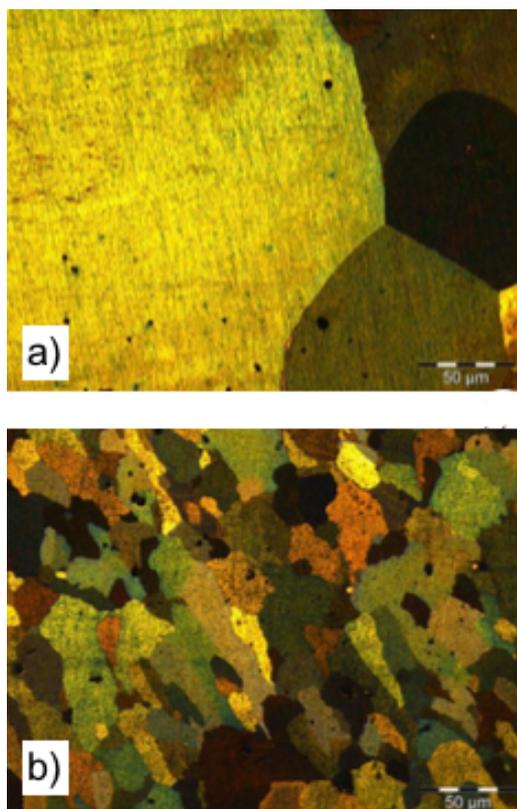


Figura 2.12.: Liga com efeito de memória de forma: a) CuAlBe, b) CuAlBe – NiNb (SILVA, 2014)

Pesquisadores como CHENTOUF *et al.* 2010, estudam como alternativa a adição do berílio nas ligas de cobre e alumínio devido ao seu valor reduzido, quando comparado ao níquel, e o aumento da resistência da liga. A adição de berílio a liga de CuAl faz com que a temperatura de transformação de fase reduza, visto que o berílio atue como um retardador de mudança de fase durante a têmpera. Dessa forma a formação da martensita (que ocorre a partir da temperatura M_i) ocorre a temperaturas abaixo das temperaturas nas ligas de CuAl sem elementos de liga (MONTECINOS, 2010).

2.3 Usinagem em ligas com memória de forma

A usinagem de ligas de níquel e titânio, liga mais comuns no campo dos SMAs, é considerada como uma usinagem particular e difícil devido a tensão residual. Adicionando a característica de memória de forma tal processo torna-se mais complexo, e não só para as

ligas de NiTi (VELMURUGAN *et al.*, 2018). Tais ligas apresentam alta dureza e viscosidade, e um comportamento pseudoelástico único. Por esta razão, algumas técnicas especiais de usinagem, como o corte por eletro erosão a fio, precisam ser empregadas (LIN, 1999).

Um dos maiores fatores que dificultam a usinagem das ligas SMAs é o alto desgaste da ferramenta (Figura 2.13), como por exemplo o desgaste de entalhe e de flanco, tanto em processos a seco quanto em processos com fluido de corte (WEINERT *et al.*, 2004). Entretanto processos como o de fresamento, torneamento e furação podem ser executados nessas ligas com a utilização de ferramentas de metal duro. Apesar de ainda não existirem muitos estudos sobre a usinagem em SMAs, principalmente para as ligas de CuAlBe, é comprovado que a usinagem destas ligas apresenta baixa qualidade superficial (WEINERT *et al.*, 2004) e aparecimento de marcas superficiais e formação de rebarbas (LIN, 1999).

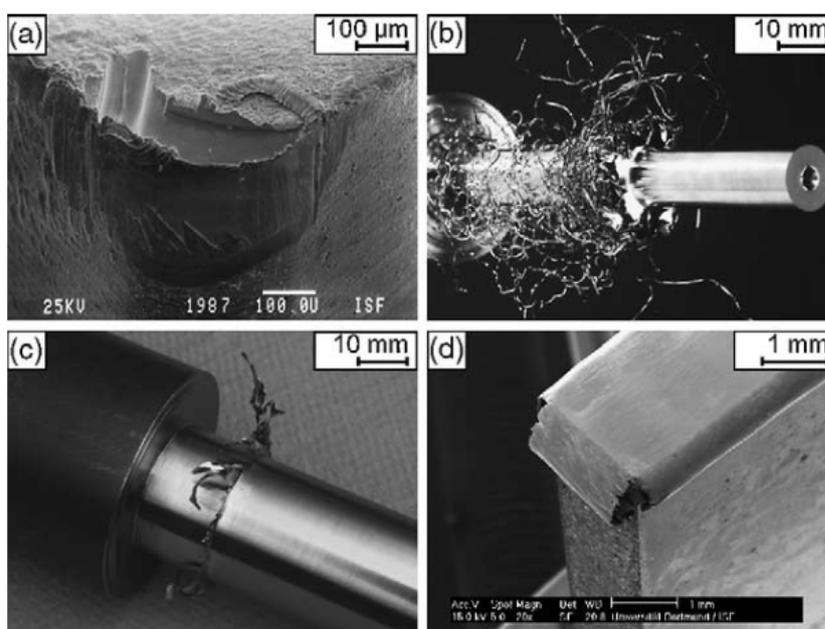


Figura 2.13: Desgaste de flanco conforme aumento de velocidade de corte (WEINERT *et al.*, 2004)

WEINERT *et al.* (2004), estudou a usinabilidade de uma liga de memória de forma 50,3%Ni - Ti a partir da velocidade de corte, avanço e sistema de lubri-refrigeração empregada em processos de torneamento e furação. Tais processos foram analisados através das forças de usinagem, desgaste da ferramenta e endurecimento subsuperficial das ligas.

A operação de torneamento foi empregada considerando 3 variações diferentes (Figura 2.14), sendo o processo com fluido de corte ou a seco. Iniciando-se com a velocidade de 20

m/min e alcançando 100 m/min foi possível observar alto desgaste na ferramenta ao iniciar o processo e redução do desgaste ao aumentar a velocidade e iniciar a utilização de fluido de corte. Já para as velocidades entre 60 m/min e 130 m/min não foi possível observar alterações significativas. Para velocidades acima de 140 m/min ocorre um alto desgaste na ferramenta. Dessa forma, fica claro que não há um padrão de comportamento para a liga utilizada variando a velocidade de corte de forma crescente, o que indica a complexidade de otimizar parâmetros de corte para a usinagem dessa classe de materiais.

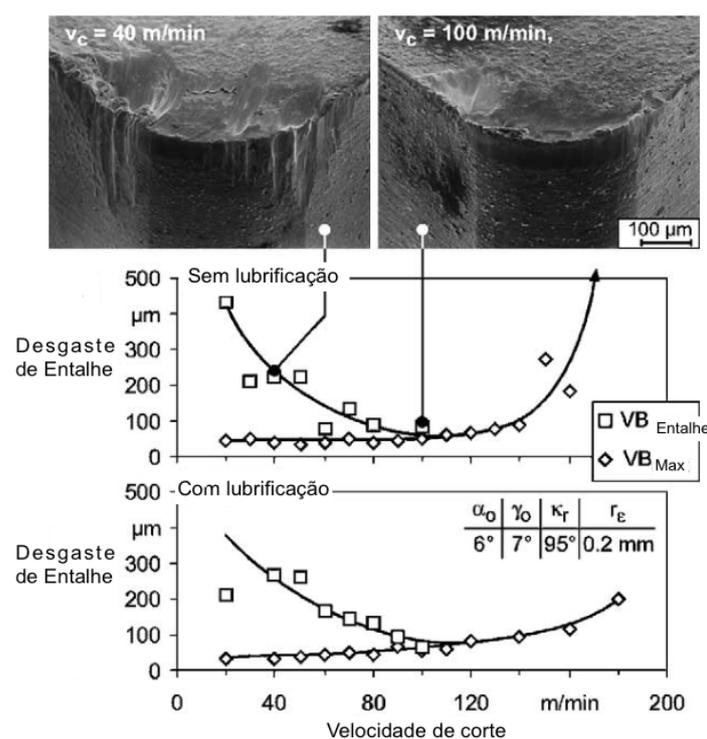


Figura 2.14: Desgaste de flanco conforme aumento de velocidade de corte (WEINERT *et al.*, 2004).

Tal dificuldade em usinar as ligas com memória de forma vem incentivando o desenvolvimento de métodos não convencionais de usinagem de maneira que preserve a amostra e diminua o desgaste da ferramenta (PHADTARE *et al.*, 2016).

Em determinadas aplicações, como processos de usinagem em materiais com liga de memória de forma, o efeito da velocidade de corte atuará diretamente nos resultados obtidos, uma vez que essa classe de materiais, quando em contato com o calor, pode sofrer mudança microestrutural e deformação plástica. Assim, estudar e determinar as velocidades é importante pois dependendo do seu valor e da sua intensidade, mudanças microestruturais

podem vir a ocorrer na peça devido ao efeito de memória de forma presente no material a ser trabalhado (YAFFAR, 2013).

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizadas 6 amostras de ligas de CuAlBe (Figura 3.1) fundidas por SILVA, 2008. Dentre as 6 amostras, 3 ligas passaram pelo tratamento térmico de têmpera para a obtenção de memória de forma, sendo aquecidas em forno tipo mufla modelo 4213 da JUNG durante 1 hora à 850 °C e resfriadas em água. A composição química das amostras são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Percentagem em peso dos constituintes fundidos para a obtenção das ligas (SILVA, 2014)

Liga	Constituição das ligas (% em peso)				
	Cu	Al	Be	Nb	Ni
CuAlBe1	87,6	11,8	0,6	-	-
CuAlBe2	87,65	11,8	0,55	-	-
CuAlBe2+ NbNi	86,88	11,8	0,55	0,5	0,27

Todas as amostras apresentaram baixa qualidade superficial, sendo perceptível por ensaio visual a presença de poros e irregularidades. A presença de poros decorrentes da fundição tem influência direta no comportamento das amostras durante a usinagem visto que podem danificar a ferramenta e gerar discrepância entre as rugosidades.

3.2 Métodos

3.2.1 Ensaios de DSC

A fim de certificar quais amostras apresentavam memória de forma, foi realizado o ensaio DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura) nas 6 ligas. Para realizar o ensaio foi necessário a padronização das amostras, conforme as especificações do equipamento, sendo peso da amostra entre 10 e 15 mg. Foi realizado o corte das 6 amostras no laboratório LABUS (Laboratório de Pesquisa em Usinagem - CEFET/RJ) com a serra de fita utilizando fluido de corte, sendo a espessura do disco entre 3 e 5 mm. Após o corte dos discos na serra de fita foi realizado o corte dos mesmos no equipamento ISOMET do LAMAT (Laboratório de Materiais – CEFET/RJ), visto que o mesmo é menos agressivo no processo de corte, evitando possíveis alterações da microestrutura da amostra, de forma que as especificações necessárias para o teste fossem atendidas. Com o intuito de evitar a deformação das amostras a velocidade de corte utilizada foi de 100 rpm utilizando álcool como fluido de corte.

As amostras foram pesadas em uma balança de precisão no laboratório MECANON (Centro de Mecânica Não-Linear – COPPE POLI/UFRJ) para verificar se estariam dentro dos parâmetros necessários para a realização do ensaio de calorimetria. Após a verificação do peso as amostras foram submetidas ao ensaio DSC utilizando o equipamento Netzsch DSC 200 F3 com fluxo de calor variando entre -120°C e 120°C por um período de 2 horas. Para a análise dos dados e construção dos gráficos de fluxo de calor foi utilizado o software Proteus Analysis - Gráfico 2012.

3.2.2 Usinagem

Foram realizados ensaios de usinagem por torneamento nas ligas com memória de forma (MF) e sem memória de forma (SMF) visando determinar as forças de usinagem e o desgaste da ferramenta. Para a usinagem das ligas cada amostra foi dividida em 4 seções (Figura 3.1) de forma que cada seção foi submetida a um avanço diferente.

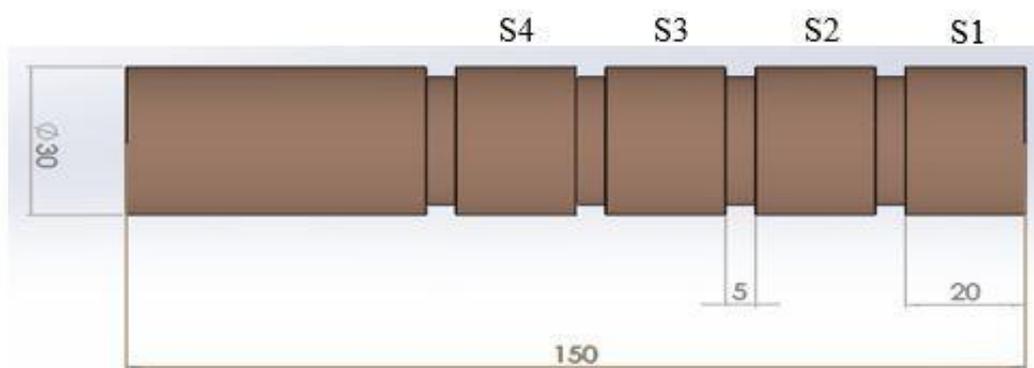


Figura 3.1: Amostra utilizada para o processo de torneamento (unidades em mm).

A usinagem por torneamento das amostras ocorreu no laboratório de usinagem LABUS (Laboratório de Usinagem - CEFET-RJ), utilizando o torno horizontal modelo Nardini Mascote, modelo MS 205. Foram utilizados insertos de metal duro modelo DCMT11T304LF - KC5025 da SANDVIK revestido em TiAlN com alta resistência a deformação. As características do inserto estão descritas na Tabela 3.2 e sua geometria é apresentada na Figura 3.2.

Tabela 3.2: Características do inserto utilizado no torneamento

D (mm)	L10 (mm)	S (mm)	Re (mm)	D1 (mm)
9,53	10,11	3,97	0,4	4,4

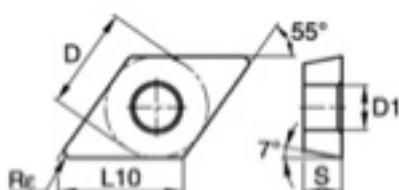


Figura 3.2: Inserto utilizado no torneamento (Catálogo ISCAR, 2010)

Para cada amostra (barra) foi usada uma ferramenta de corte nova, totalizando 6 pontas de ferramenta. Dessa forma foi possível estudar o desgaste da ferramenta em função da composição química do material. Foram utilizados como parâmetros de corte fixos a

velocidade de corte, ângulo efetivo de corte e profundidade de corte (Tabela 3.3), e como parâmetro variável foi utilizado o avanço.

Tabela 3.3: Parâmetros de usinagem.

Vc (mm/min)	ap (mm)	Ângulo efetivo de corte (°)	f (mm/rev)
145	0,5	90	0,042
			0,057
			0,063
			0,073

3.2.3 Forças de Usinagem

Para a análise de forças de usinagem foi utilizado o dinamômetro modelo KLISTER 9257 - National Instruments. A Figura 3.3 mostra, de forma esquemática, os equipamentos utilizados para a aquisição, leitura e armazenamento dos dados de força.

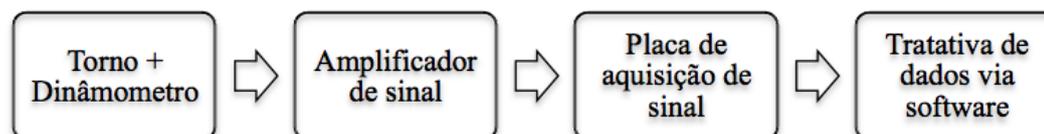


Figura 3.3: Fluxo para a aquisição de dados

O dinamômetro foi acoplado ao torno e integrado a um amplificador de carga (KISTLER - Modelo 5233A) que possui a função de interpretar os estímulos provenientes das células de carga presentes no dinamômetro. A placa de aquisição de dados (NI USB - 6221, National Instruments) (Figura 3.4a e Figura 3.4b) que transformam os estímulos elétricos recebidos em valores de forças (passiva – F_p , avanço - F_f e de corte - F_c) presentes no processo de usinagem (Figura 3.5c). Os dados são enviados ao software LabView Signal Express (National Instruments) onde os dados são armazenados. Por fim os dados foram importados para um software de geração de gráficos para a análise dos valores obtidos.

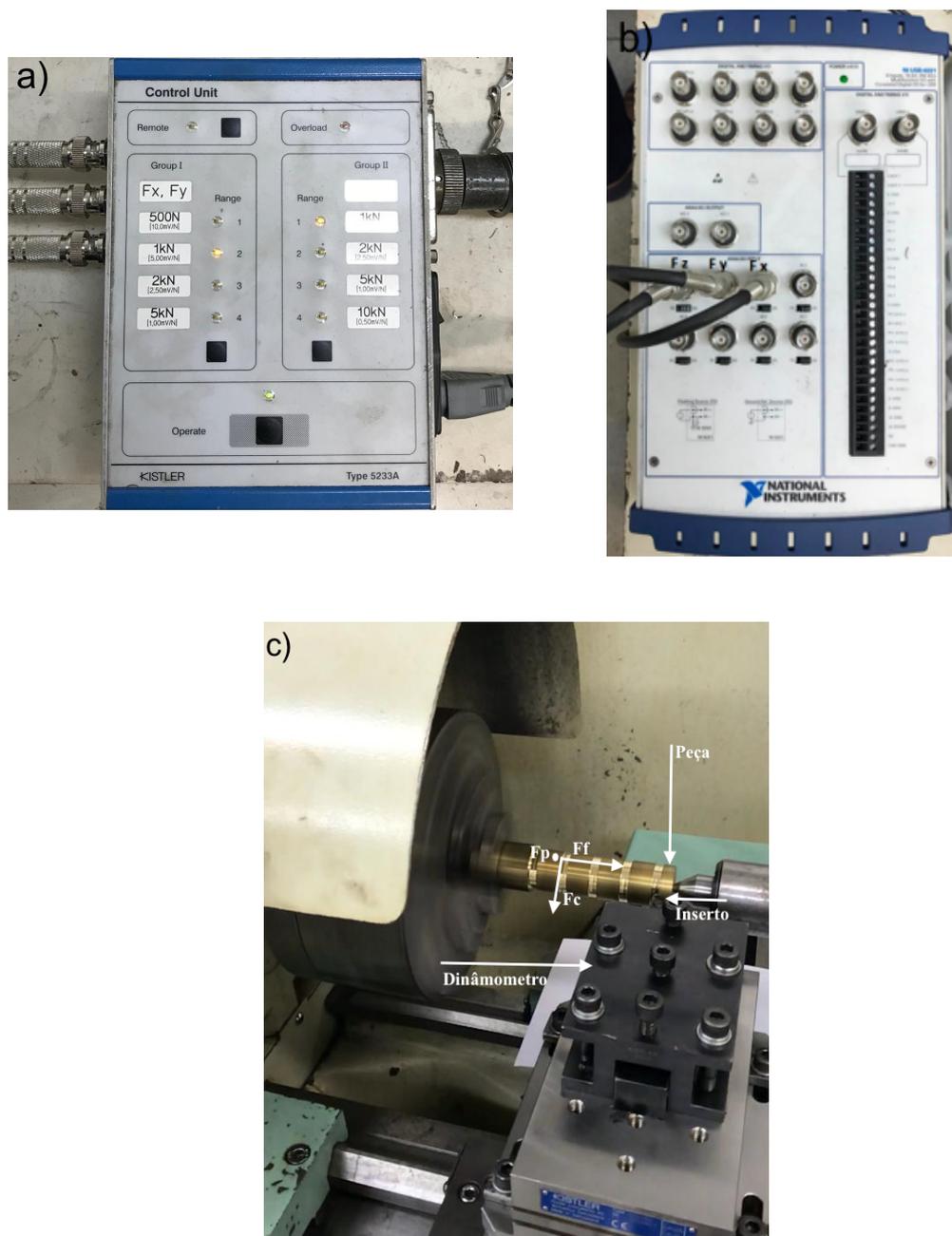


Figura 3.4: Montagem do sistema de aquisição de forças de usinagem: (a) amplificador de sinal, (b) placa de aquisição de dados e (c) dinâmômetro e peça montados no torno.

3.2.4 Análise de Desgaste da Ferramenta de corte

Para a análise do desgaste das ferramentas de corte foi utilizado o microscópio modelo Olympus BX60M, do LAMAT (Laboratório de Materiais – CEFET/RJ). Foram obtidas fotos

através do software *Scream Essentials* com aumentos de 100 vezes do flanco e da superfície de saída das ferramentas.

3.2.5 Rugosidade

A rugosidade média (R_a) e a rugosidade máxima (R_t) das amostras foi medida utilizando o rugosímetro Mitutoyo SJ 210 (Figura 3.5) no LABUS/CEFET-RJ, onde de forma aleatória foram realizadas cinco medições da rugosidade em cada uma das quatro seções das seis amostras. Como parâmetros do rugosímetro foram estabelecidos um *cut off* de 0,8 mm e um comprimento a ser percorrido pela haste de 2,5 mm.

Após obtidos todos os valores de R_a e R_t experimentais, foram feitos os cálculos para a rugosidade média teórica (Equação 2.10) e rugosidade máxima teórica da superfície acabada (Equação 2.11) considerando os quatro diferentes valores de avanço (f) e o raio da ponta da ferramenta (R_e).

Capítulo 4

Resultados e Discussão

No capítulo anterior foi descrito a metodologia experimental aplicada às seis amostras de CuAlBe, como também todos os materiais e equipamentos utilizados para a realização dos testes. Todos os parâmetros experimentais escolhidos foram descritos para melhor compreensão a respeito dos resultados obtidos que serão analisados e discutidos neste capítulo.

Inicialmente foi discutida a transformação de fase das ligas caracterizando os materiais com e sem memória de forma através do ensaio DSC. Em seguida foram apresentadas as forças obtidas durante a usinagem das ligas, analisando o comportamento das mesmas de acordo com suas variações de composição química, tratamento térmico e valores de avanço. Com a obtenção das forças de corte foi possível, então, analisar a variação da pressão específica de corte e se as ligas se comportam conforme o descrito na teoria. Ainda no âmbito das amostras será analisado o cavaco proveniente do torneamento e a relação da sua forma com as forças de usinagem. O penúltimo tópico a ser analisado foi o desgaste da ferramenta, onde foi avaliado o grau e os diferentes tipos de desgaste provenientes do processo. Por fim a rugosidade foi analisada e relacionada, de uma maneira geral, com os outros dados.

4.1. Ensaio de DSC

Após os ensaios de DSC foi verificado que 3 amostras apresentaram características de memória de forma e 3 não possuíam. A Tabela 4.1 mostra a nomenclatura adotada para diferenciar as amostras.

Tabela 4.1: Identificação das ligas

Amostra	Composição Química	Condição
1SMF	Cu - 11,8%Al - 0,6%Be	Não Temperada
1MF		Temperada
2SMF	Cu - 11,8%Al - 0,55%Be	Não Temperada
2MF		Temperada
3SMF	Cu - 11,8%Al - 0,55%Be - 0,5%Nb - 0,27%Ni	Não Temperada
3MF		Temperada

Com as curvas obtidas nos ensaios DSC (Figura 4.1), é possível identificar as amostras sem e com memória de forma através dos gráficos de fluxo de calor, uma vez que as amostras com memória de forma apresentam um pico de temperatura, o qual indica a transformação da fase martensítica para austenítica e vice-versa. Pode-se observar que a transformação de fase das amostras 2MF e 3MF ocorreu a temperaturas próximas a temperatura mínima definida ($T_{min} = -120^{\circ}C$), dessa forma vale ressaltar que a variação de temperatura entre o início e o final da transformação de fase poderia ter sido maior caso o valor da temperatura mínima determinada tivesse sido menor. Com relação aos resultados do ensaio de DSC em função da liga, verifica-se a variação nas temperaturas de mudança de fase das ligas com memória de forma (Tabela 4.2).

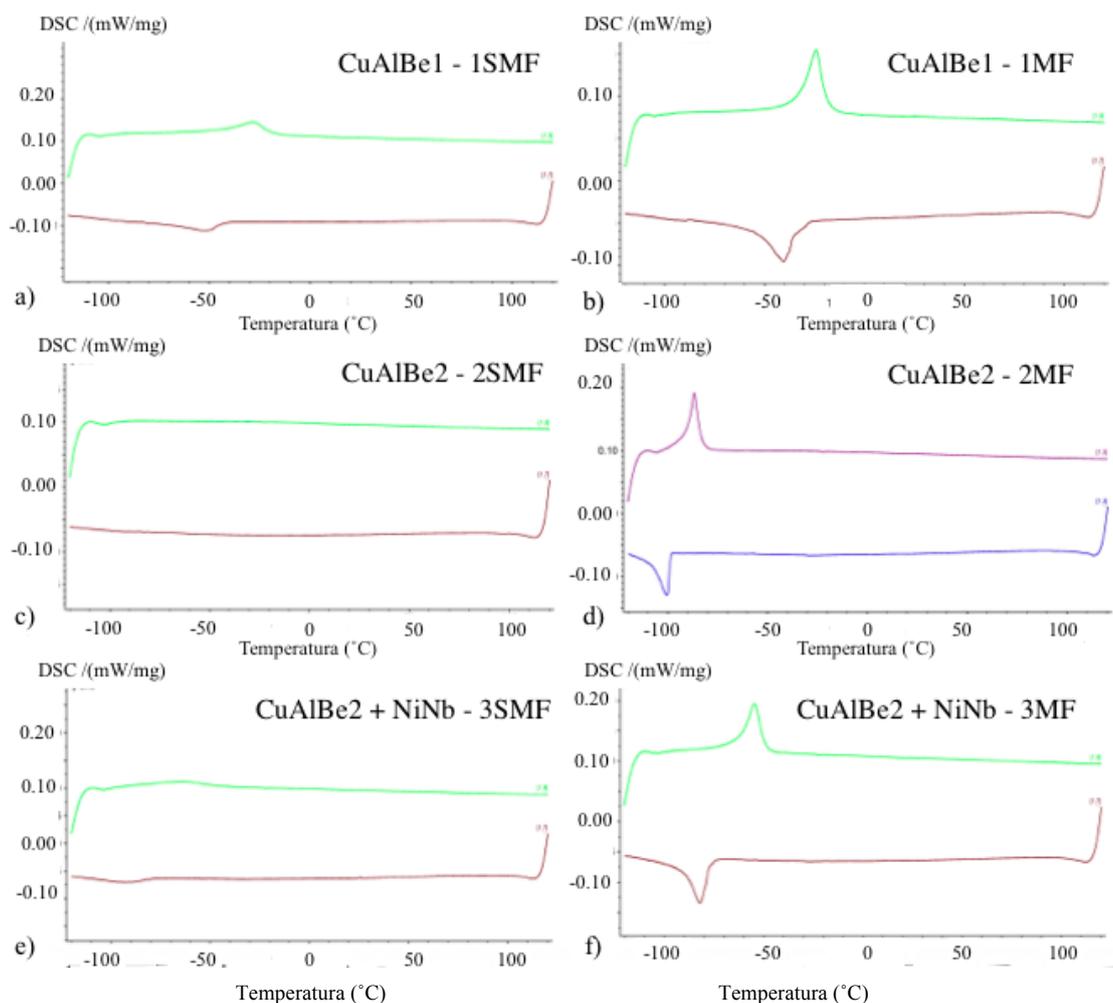


Figura 4.1: Gráficos DSC das ligas sem e com memória de forma.

Tabela 4.2: Temperatura de mudança de fase das ligas com memória de forma

Ligas	Fases			
	Martensítica		Austenítica	
	Mi (°C)	Mf(°C)	Ai (°C)	Af (°C)
1MF	-35,1	-51,1	-32,8	-18,6
2MF	-98,9	-106,6	-90,1	-83,1
3MF	-77,3	-87,5	-60,6	-49,6

A presença do berílio atuou de forma a retardar a transformação de fase, tanto austenítica quanto martensítica. Pode-se observar também que as ligas com menores teores de berílio tiveram a sua transformação de fase em temperaturas mais baixas. Apesar da diferença de concentração de berílio ser pequena, é possível observar a diferença de aproximadamente 60°C entre o início da transformação martensítica das ligas 1MF e 2MF. Já a adição de níquel

e nióbio na amostra 3MF aumentou a temperatura de transformação de fase quando comparada à liga com a mesma porcentagem de berílio (2MF).

Para as amostras 1SMF, 2SMF e 3SMF não houve transformação de fase ao serem submetidas à mesma variação de temperatura e fluxo de calor, comprovando a característica de materiais sem memória de forma. Foi observado que a amostra 1SMF apresentou um pequeno pico de energia (Figura 4.1.a), entretanto não caracteriza um comportamento de memória de forma quando comparado às amostras 1MF, 2MF e 3MF, visto que o fluxo de calor envolvido no processo foi consideravelmente menor. Tal comportamento pode ter ocorrido devido à transformação plástica que a amostra pode ter sofrido durante a preparação da mesma.

4.2. Força de usinagem

A Figura 4.2 apresenta um exemplo dos gráficos de força de usinagem obtidos nos testes com dinamômetro. Observa-se que houve uma maior amplitude nas forças de avanço e passiva, o que levou o foco desse trabalho para os dados de forças de corte, que é a força principal nos processos de usinagem. Para uma melhor análise das forças foi feita a média dos valores das forças, sendo possível desta forma observar a variação das mesmas, como apresenta a Tabela 4.3.

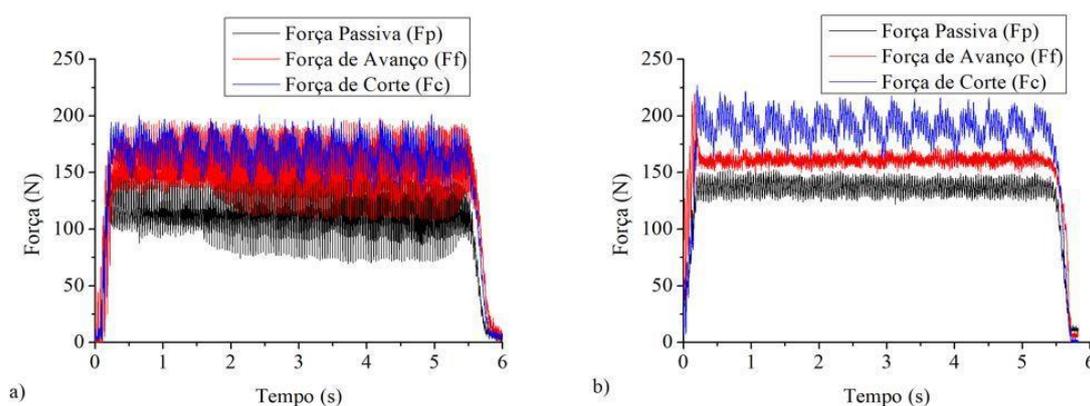


Figura 4.2: Forças de usinagem com avanço de 0,073 mm/rev ; a) Liga CuAlBe2 e b) Liga CuAlBe2 + NiNb

Tabela 4.3: Média das forças de usinagem

Liga	f (mm/rev)	Sem Memória de Forma			Com Memória de Forma		
		Fc (N)	Ff (N)	Fp (N)	Fc (N)	Ff (N)	Fp (N)
CuAlBe1	0,042	102 ± 7	145 ± 9	85 ± 7	133 ± 6	166 ± 9	124 ± 6
	0,057	152 ± 7	190 ± 4	146 ± 6	168 ± 9	139 ± 12	119 ± 10
	0,063	155 ± 9	196 ± 11	145 ± 10	186 ± 10	169 ± 10	128 ± 8
	0,073	164 ± 13	214 ± 20	144 ± 17	182 ± 11	185 ± 13	137 ± 12
CuAlBe2	0,042	123 ± 5	233 ± 9	151 ± 7	134 ± 7	147 ± 13	125 ± 10
	0,057	160 ± 8	204 ± 10	155 ± 9	161 ± 11	152 ± 19	126 ± 12
	0,063	118 ± 9	173 ± 15	102 ± 9	172 ± 10	161 ± 14	130 ± 12
	0,073	191 ± 8	213 ± 10	167 ± 10	167 ± 13	155 ± 20	114 ± 18
CuAlBe2 +NiNb	0,042	133 ± 8	124 ± 8	166 ± 6	174 ± 7	161 ± 4	156 ± 4
	0,057	141 ± 8	122 ± 6	137 ± 8	153 ± 8	169 ± 4	121 ± 5
	0,063	151 ± 7	150 ± 5	140 ± 5	172 ± 8	172 ± 5	129 ± 4
	0,073	189 ± 9	156 ± 7	185 ± 8	192 ± 11	161 ± 3	138 ± 6

Com base na Figura 4.3 é possível notar que, de uma maneira geral, as forças de corte para as ligas com memória de forma foram maiores quando comparadas com as ligas sem memória de forma. Contudo, as amostras se comportaram de maneira diferente e não possuem uma relação geral entre as ligas sem e com memória de forma. Analisando a composição química pode-se dizer que na liga CuAlBe1 (Figura 4.3a) a força de corte cresceu conforme o aumento do avanço, sendo as forças para a amostra com memória de forma ligeiramente maior. Já para a liga CuAlBe2 (Figura 4.3b) não ocorreu um padrão entre o aumento da força e o avanço. Observa-se nesse caso um crescimento na força de corte para ambas as amostras até o avanço de 0,063 mm/rev, onde neste ponto a amostra sem memória de forma tem uma redução brusca na força de corte e logo em seguida um aumento de mais de 50 N no avanço de 0,073 mm/rev, sendo essa a força máxima entre as duas amostras. Por fim para a liga CuAlBe2 + NiNb (Figura 4.3c) foi observado pouca variação de força entre as amostras sem e com memória de forma.

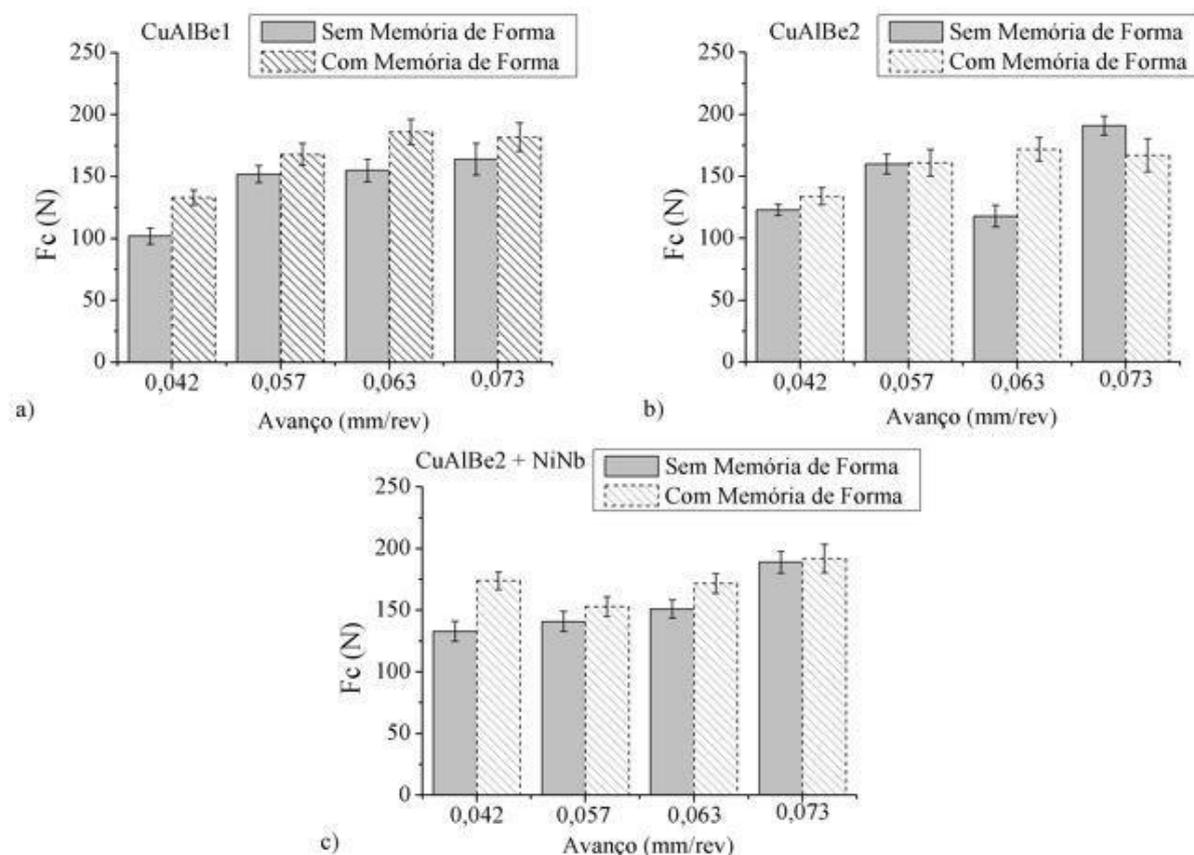


Figura 4.3: Gráficos de forças de corte média: (a) CuAlBe1, (b) CuAlBe2 e (c) CuAlBe2 + NiNb

Já esperava-se que as ligas com memória de forma apresentassem valores de forças maiores, visto que tais ligas, de acordo com a literatura, apresentam maiores durezas. Entretanto não é possível indicar a causa real dessa diferença entre as forças das ligas sem e com memória de forma visto que não foi feito nenhum ensaio de dureza ou de microestrutura que pudesse relacionar a diferença física entre as ligas sem e com memória de forma.

4.2.1. Pressão específica de corte

Uma vez obtidos os valores das forças de corte, que atuaram no processo de usinagem, pôde ser feita a análise da pressão específica de corte, fator de proporcionalidade dependente das componentes da força de usinagem e da área da seção de corte, conforme Equação 2.8. Os quatro avanços definidos para realização do processo foram utilizados para o cálculo da área da seção de corte, a qual é inversamente proporcional ao valor do K_s (Equação 2.9). Sendo

assim, é esperado que com o aumento do avanço a pressão específica de corte diminua.

Analisando a Figura 4.4 verifica-se que as ligas com memória de forma comportaram-se conforme o esperado, visto que a pressão específica nas ligas decresceu com o aumento do avanço, tendo o seu menor valor com 0,073 mm/rev. Já nas ligas sem memória de forma não ocorreu um decréscimo conforme o aumento do avanço. Quando comparado os materiais sem e com memória de forma, pode-se afirmar que as pressões específicas são maiores nas ligas com memória de forma.

As ligas sem memória de forma tiveram comportamentos diferentes entre si, o que pode ser relacionado com a quantidade de berílio e adição dos elementos de liga. As ligas com presença de níquel e nióbio comportaram-se de forma não esperada. A liga 3SMF teve a menor pressão específica no avanço de 0,063 mm/rev, já a liga 3MF apesar de ter obtido a menor pressão em 0,073 mm/rev teve um comportamento irregular ao longo do aumento dos avanços.

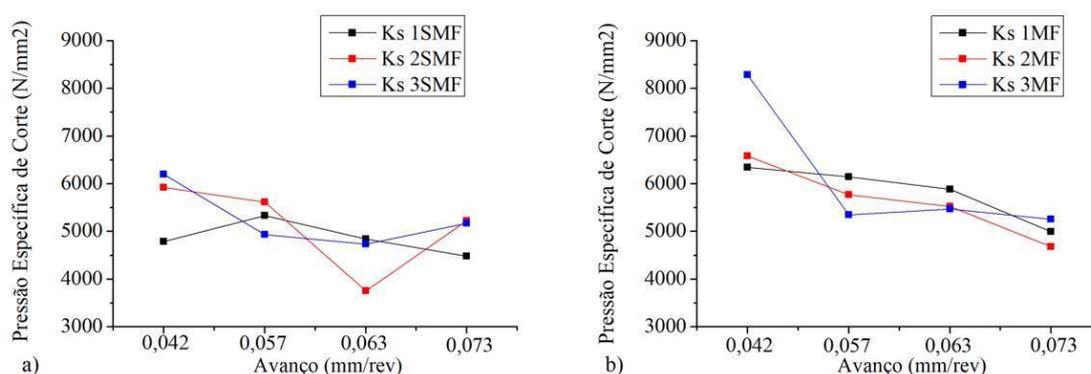


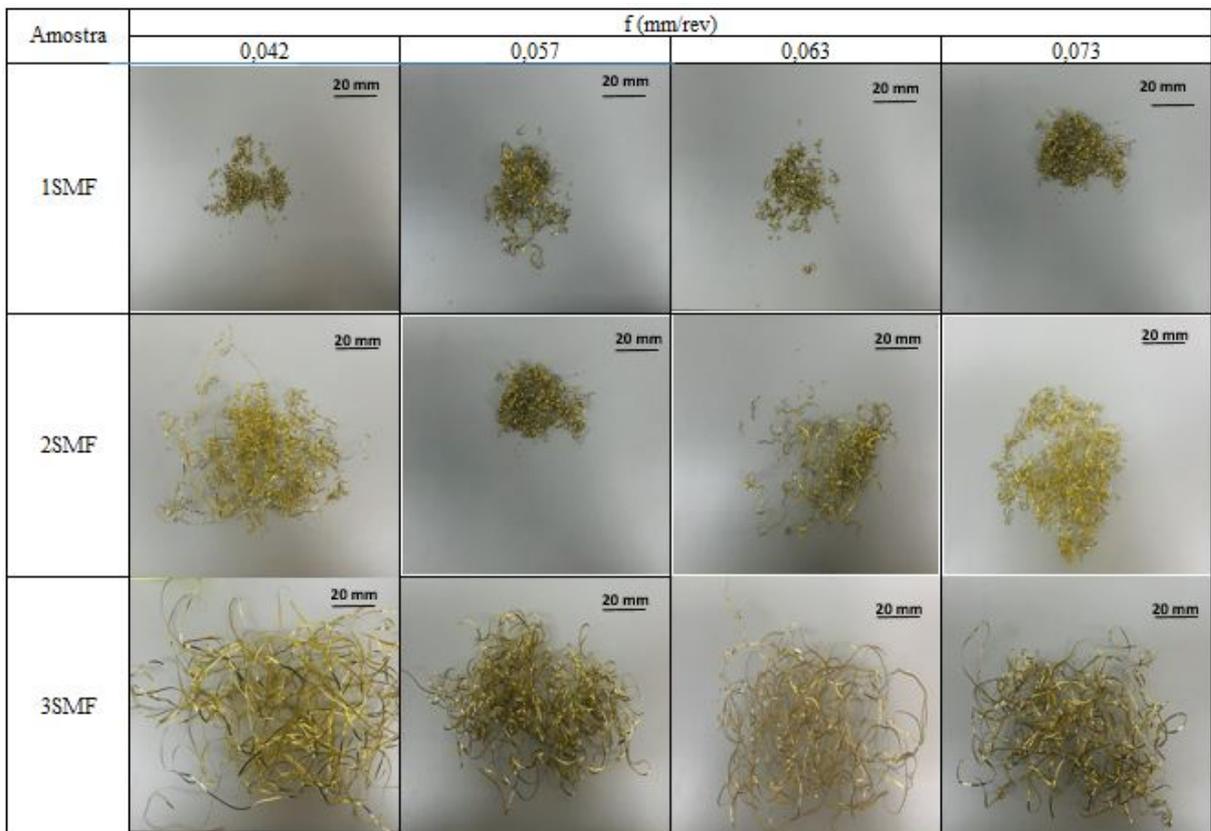
Figura 4.4: Pressão específica de corte; a) Ligas sem memória de forma e b) Ligas com memória de forma

De acordo com AWF - *Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung*, Associação de Produção da Alemanha, para o cobre o valor da pressão específica de corte para um avanço de 0,1 mm/rev é de 2100 N/mm². Desta forma é possível observar que a presença dos elementos de liga aumentara a pressão específica de corte, visto que para um suposto avanço de 0,1 mm/rev, acompanhando a tendência do gráfico, resultaria em uma pressão específica de corte de aproximadamente 4000 N/mm² (Figura 4.4b). Vale ressaltar que apesar das ligas

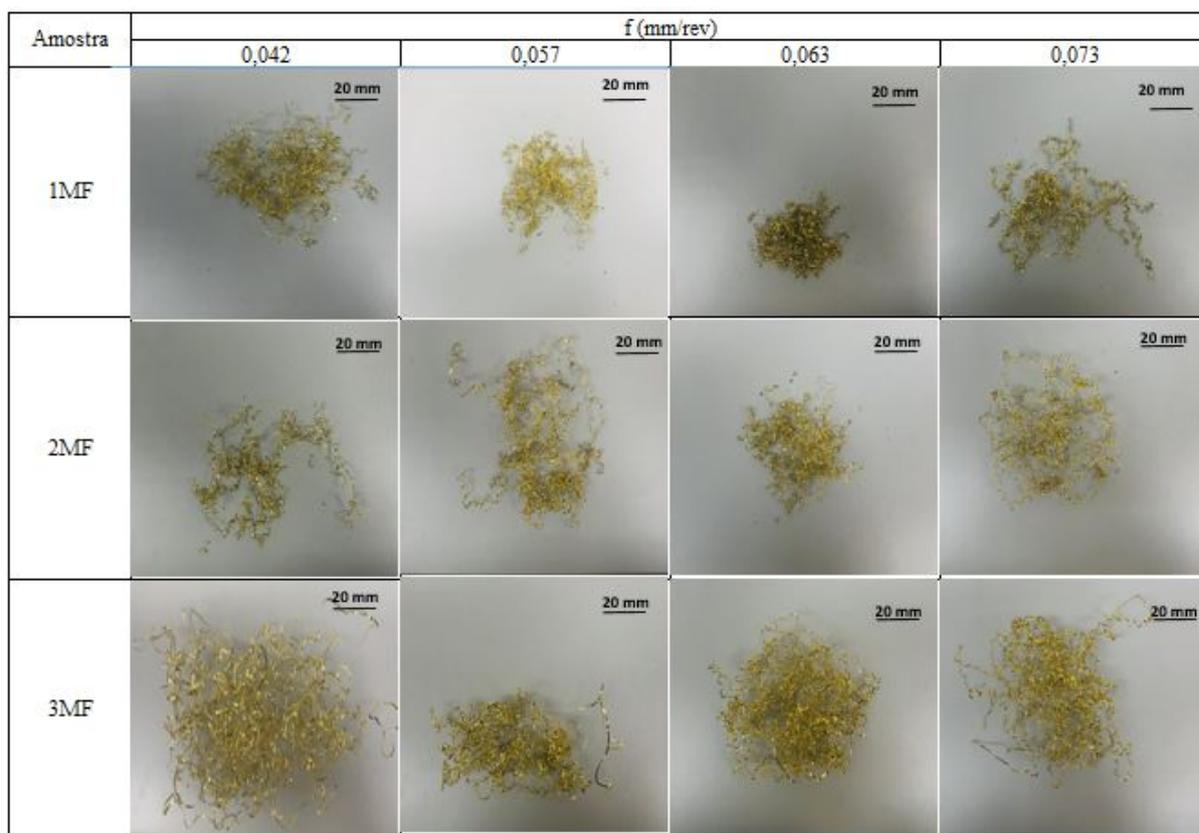
utilizadas possuem elementos de liga, tal valor foi utilizado para comparação devido as ligas utilizadas não possuem bibliografias para referência.

4.3. Estudo do cavaco

Quanto a análise dos cavacos obtidos no processo de usinagem não foi constatado nenhum padrão entre as ligas sem e com memória de forma. Analisando esses dois grupos, ambos apresentaram cavacos no formato em fita, helicoidal e em lascas (Figura 4.5). Sendo assim, o fator mais determinante para o tipo de cavaco formado foi a composição química das amostras.



(a)



(b)

Figura 4.5: Cavacos após usinagem a) Ligas sem memória de forma b) Ligas com memória de forma

Comparando as amostras da liga CuAlBe1, a amostra sem memória de forma obteve cavacos no formato em lascas que, de acordo com a literatura (DINIZ *et al.*, 2013), caracteriza um material frágil; enquanto a amostra com memória de forma apresentou um cavaco em formato helicoidal. Já entre as amostras da liga CuAlBe2 não foi constatado nenhum padrão, dessa forma o avanço foi o fator decisivo para o tipo de cavaco, uma vez que foi a liga que obteve os três tipos de cavacos (em lasca, helicoidal e em fita). Para as amostras da liga CuAlBe2 + NiNb a amostra sem memória de forma teve o cavaco em fita para todos os avanços, sendo este o mais deletério para a usinagem, uma vez que este tipo de cavaco pode enrolar na ferramenta e/ou na peça e arranhá-la, prejudicando o acabamento superficial das amostras e podendo quebrar a ferramenta de corte. Já na amostra com memória de forma foi predominante a forma helicoidal.

As amostras com adição de níquel e nióbio obtiveram os cavacos em fita, o que indica que a adição destes elementos foi prejudicial para o processo de usinagem. Tal tipo de cavaco foi observado na liga CuAlBe2 no avanço 0,042 mm/rev e nas ligas CuAlBe2 + NiNb, dessa

forma, as ligas com adição de níquel e nióbio e o avanço de 0,042 mm/rev apresentaram as piores condições observadas utilizando como critério os cavacos. De acordo com DINIZ *et al.* (2013), os menores avanços apresentam os cavacos com propriedades menos deletérias para o processo de usinagem, entretanto conforme mencionado o avanço de 0,042 mm/rev apresentou o cavaco mais prejudicial para o processo.

Quanto às forças, conforme citado na seção 4.2, no geral as ligas com memória de forma apresentaram maiores forças de corte, esperando-se portanto que os seus cavacos tivessem características frágeis. A única condição que apresentou força de corte maior para a amostra sem memória de forma foi a CuAlBe2 com avanço de 0,073 mm/rev. Dessa maneira, o cavaco da liga sem memória de forma teria características frágeis e o cavaco referente a liga com memória de forma características dúcteis. Sendo assim, identifica-se na Figura 4.6a que a amostra 2MF é caracterizada como dúctil, visto que as extremidades do cavaco e suas corrugações apresentam-se com características de escoamento. Já a amostra 2SMF apresenta cavacos com características mais frágeis e com um grau de recalque maior (Figura 4.6b).

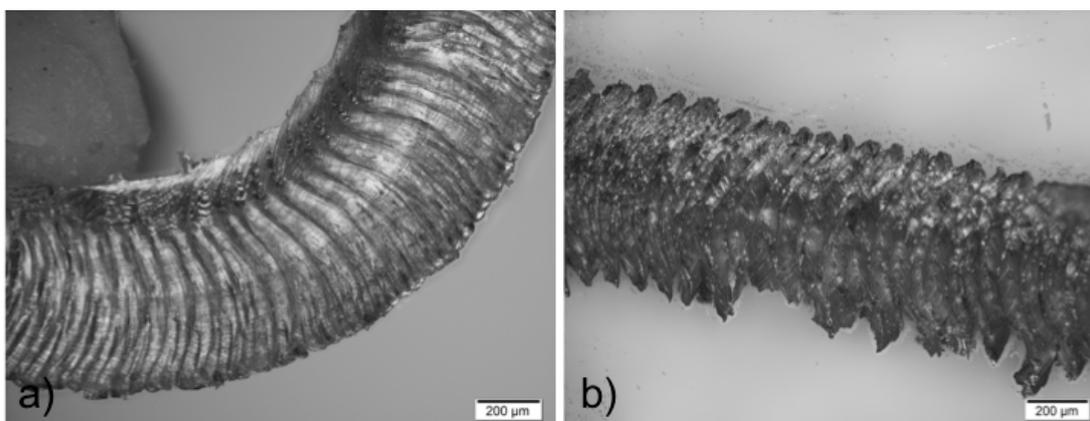


Figura 4.6: Cavacos obtidos para avanço de 0,073 mm (aumento 100x): a) com memória de forma e b) sem memória de forma.

4.4. Desgaste da ferramenta

Primeiramente para análise do desgaste da ferramenta foi levado em consideração o nível de desgaste de flanco obtido em cada ferramenta (Figura 4.7 e Tabela 4.4). Pode-se, portanto, afirmar que as ferramentas que foram utilizadas para usinar materiais sem memória de forma apresentaram um nível de desgaste de flanco superior às utilizadas para usinar

materiais com memória de forma, o que não era esperado pois as maiores forças de corte foram observadas nas ligas com memória de forma.

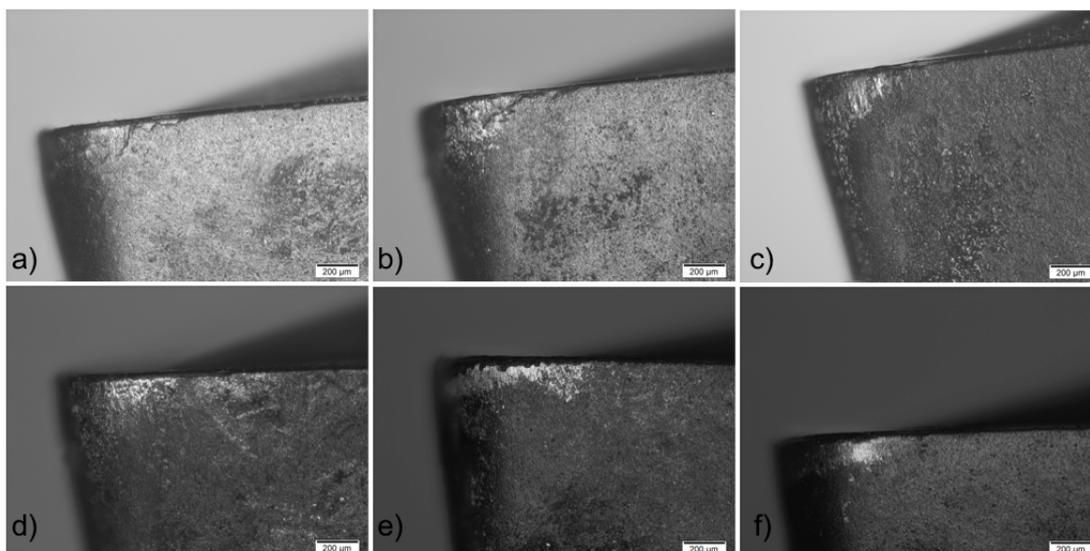


Figura 4.7.: Desgaste no flanco principal das ferramentas de corte para as ligas: a) 1SMF, b) 2SMF, c) 3SMF, d) 1MF, e) 2MF e f) 3MF.

Tabela 4.4.: Nível de desgaste de flanco da ferramenta após usinagem

Amostra	1SMF	2SMF	3SMF	1MF	2MF	3MF
Nível de desgaste (mm)	0,22	0,27	0,30	0,19	0,24	0,21

Considerando o nível de desgaste de flanco da ferramenta foi possível relacionar a qualidade da superfície usinada com o desgaste da ferramenta de corte e o tipo de cavaco formado, uma vez que a formação do cavaco ocorre no flanco principal da ferramenta. Para o desgaste mais acentuado (usinagem da amostra 3SMF) foi observado para todos os avanços o cavaco em fita, considerado o tipo de cavaco mais deletério para o processo. Já para a liga 1MF, observou-se um menor nível de desgaste onde obteve-se o melhor tipo de cavaco, em lascas. Pode-se verificar pela Figura 4.7 que as ferramentas utilizadas no processo de usinagem dos materiais sem memória de forma possuíram um acentuado desgaste de flanco, o que ocorre pela alta taxa de abrasão causada pela presença de elementos duros no material usinado.

Observando a Figura 4.8 é possível dizer que as ligas sem e com memória de forma apresentaram trincas na superfície de saída da ferramenta após a usinagem. Pela análise da vista superior da ferramenta não é possível estabelecer uma relação entre os tipos de desgaste com a característica da memória de forma. Entretanto, as ferramentas utilizadas para usinar a liga CuAlBe2 + NiNb (Figuras 4.8c e 4.8d) não apresentaram trincas, tanto para a liga sem memória de forma quanto para a liga com memória de forma.

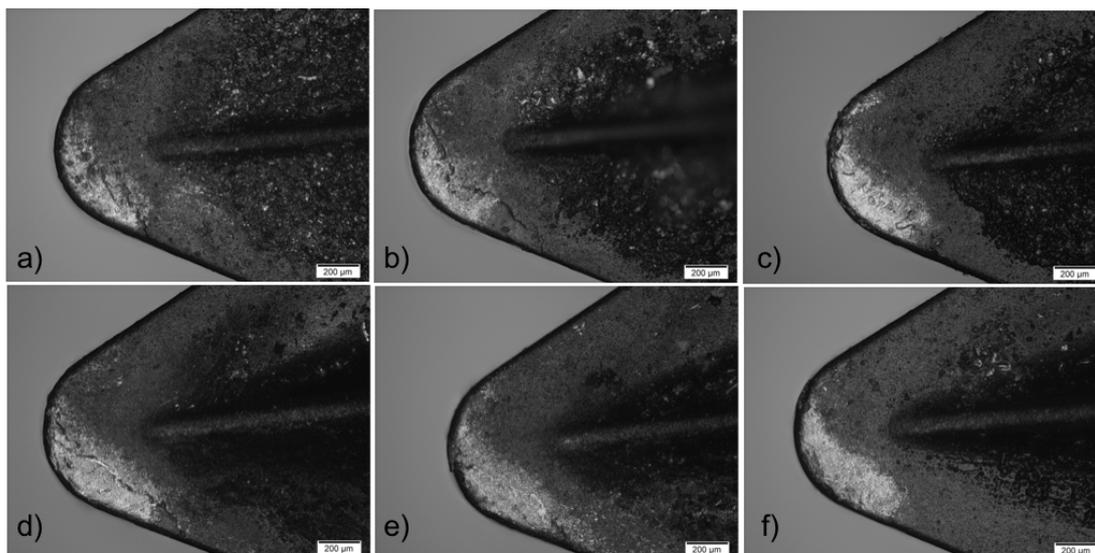


Figura 4.8: Ferramentas de usinagem em vista superior; a) Liga 1SMF, b) Liga 2SMF, c) Liga 3SMF, d) Liga 1MF, e) Liga 2MF e f) Liga 3MF

As trincas geradas nas ferramentas de corte (Figuras 4.8b e 4.8d) são paralelas à aresta de corte e, dessa forma, é possível dizer que a sua origem foi mecânica e não térmica (DINIZ *et al.*, 2013). As ferramentas de corte que apresentaram trincas não tiveram relação com as forças de corte e, por este motivo, estima-se que as trincas presentes podem ter sido decorrentes das imperfeições na superfície das amostras, como a presença de poros resultantes de uma falha de fundição, pois foi observado nos gráficos de força alguns picos isolados de forças de usinagem (Figura 4.9).

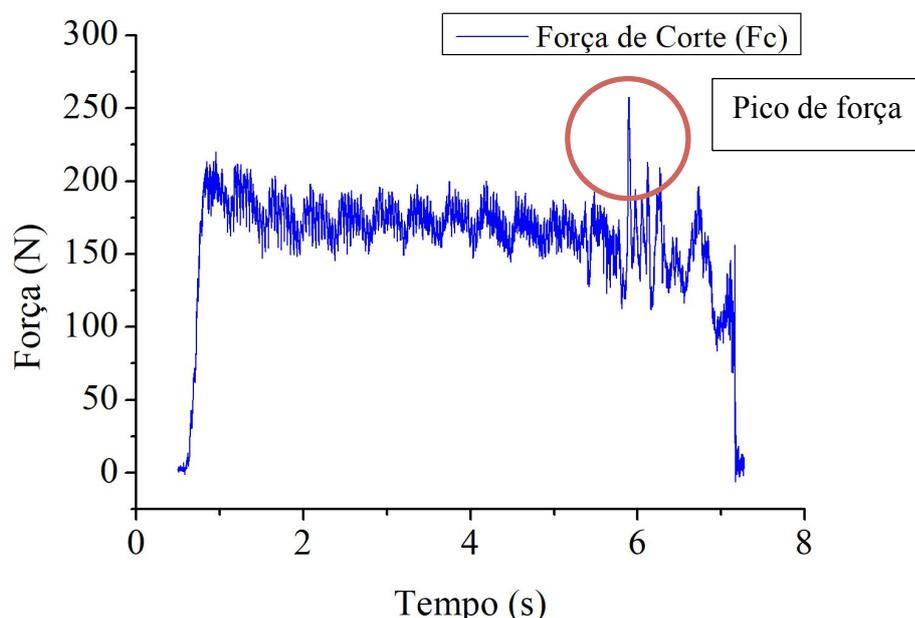


Figura 4.9: Gráfico de força de corte.

4.5 Rugosidade

A última análise feita foi a da rugosidade visto que o acabamento superficial das amostras é consequência de todos os parâmetros analisados anteriormente. Através da Figura 4.10 fica evidente, tanto para a rugosidade média quanto para a rugosidade máxima, a discrepância entre os valores obtidos experimentalmente e os valores teóricos calculados com as Equação 2.10 e 2.11. Tal discrepância ocorre devido a fatores como vibração, deformação e fluxo lateral do cavaco. As amostras sem e com memória de forma apresentaram maiores valores de rugosidade média (R_a), o que significa um pior acabamento superficial. Quanto a rugosidade máxima (R_t) não ficou evidente nenhum padrão quando comparados com a rugosidade teórica calculada.

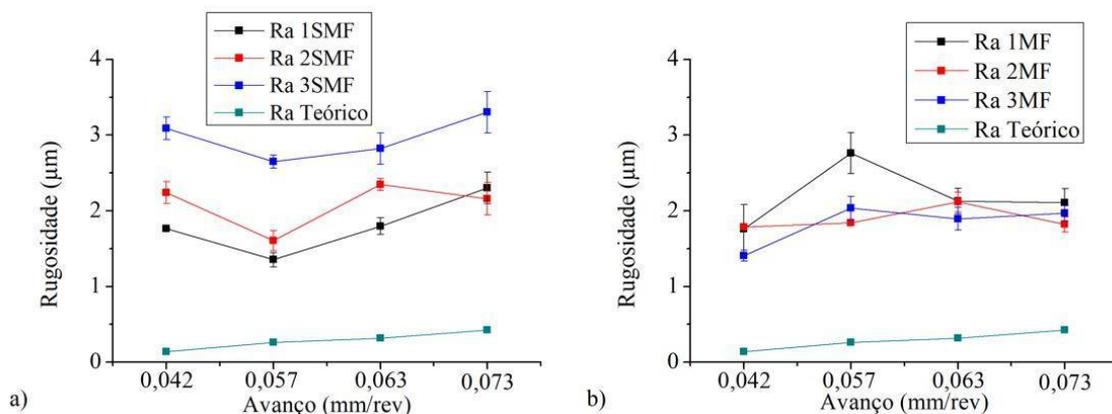


Figura 4.10: Gráfico de rugosidade média ; a) Amostras sem memória de forma; b) Amostras com memória de forma

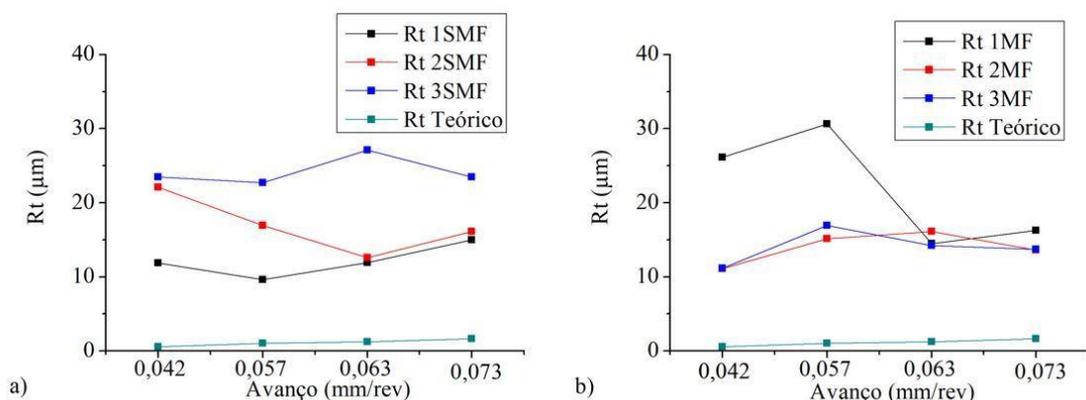


Figura 4.11. Gráfico de rugosidade máxima: a) Amostras sem memória de forma; b) Amostras com memória de forma

As ligas sem memória de forma tiveram um comportamento similar a rugosidade teórica a partir do avanço 0,057 mm/rev, onde com o aumento do avanço ocorre também um aumento da rugosidade. Já as ligas com memória de forma possuíram comportamentos distintos, onde através da curva teórica não é possível obter um padrão do comportamento experimental. Tal discrepância pode ser explicada pela mudança de fase da amostra proveniente do aumento da temperatura e tensão ao longo do processo de usinagem, fatores que não são considerados para o cálculo da curva teórica. Outro ponto a ser observado é que para as amostras sem memória de forma, o avanço de 0,057 mm/rev foi o mais satisfatório visto que a rugosidade nele foi mínima, já para as amostras com memória de forma foi o ponto com maior valor de rugosidade, quando analisado estatisticamente.

Quando os gráficos de R_a são comparados em relação a composição química, as ligas sem memória de forma apresentaram menor rugosidade para a amostra 1SMF, enquanto que entre as ligas com memória de forma a menor rugosidade foi observada na liga 3MF no avanço de 0,042 mm/rev, sendo essa a pior condição entre as ligas sem memória de forma. Em relação a liga CuAlBe2 + NiNb, observa-se pelo valor da rugosidade que foi o pior acabamento superficial encontrado dentre todas as demais ligas sem memória de forma (independente do avanço usado), o que evidencia a composição química como principal responsável pelo resultado analisado. Visto isso, é possível dizer que a adição de elementos de liga entre as amostras sem e com memória de forma resultaram em diferentes influências, sendo que para as amostras sem memória de forma o melhor acabamento superficial foi para a liga CuAlBe1, enquanto que entre as ligas com memória de forma foi para a liga CuAlBe2 + NiNb.

Nota-se através da Figura 4.12a que as ligas sem memória de forma comportaram-se conforme o esperado quando relacionando a força de corte média com a rugosidade. O aumento da força pode gerar um aumento na vibração ao longo da usinagem, o que reduz a qualidade superficial da amostra e aumenta sua rugosidade. Já as ligas com memória de forma (Figura 4.12b) não obtiveram tal relação; a partir do avanço de 0,057 mm/rev a rugosidade não apresentou grandes variações. Dessa forma pode-se dizer que o aumento da força ao longo da usinagem não teve um efeito significativo no acabamento das amostras com memória de forma.

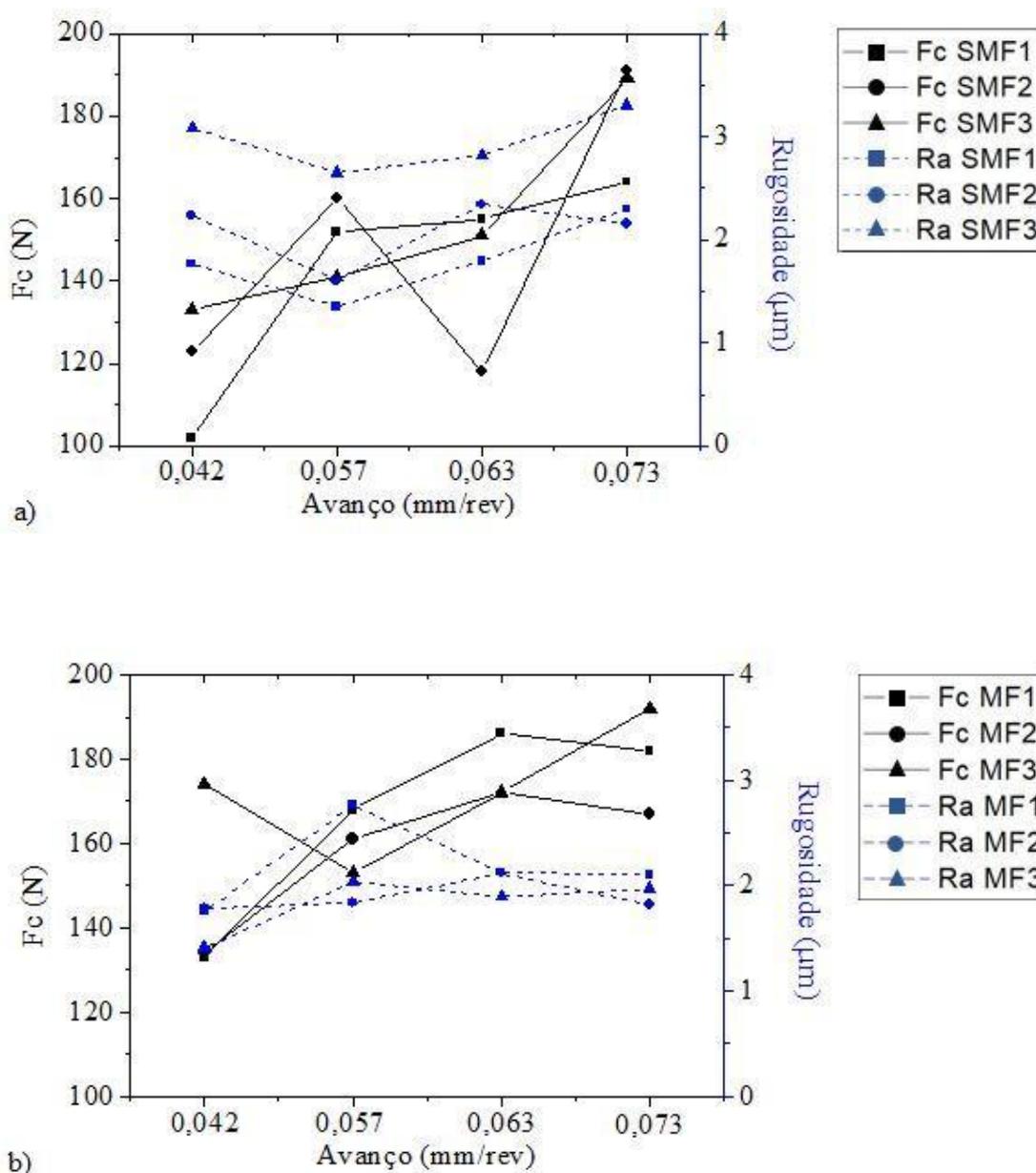


Figura 4.12: Gráfico de comparação entre força de corte média e rugosidade média:

a) Amostras sem memória de forma, b) Amostras com memória de forma

Relacionando-se os cavacos obtidos após a usinagem com as rugosidades superficiais, verifica-se que o cavaco em fita foi identificado em todos os avanços na amostra 3SMF (Figura 4.5.a), amostra essa com o pior acabamento superficial. Conforme apresentado na seção 4.3, o cavaco em fita pode enrolar na ferramenta, na peça e arranhá-la, prejudicando o acabamento superficial das amostras. Além disso, também foi visto na seção 4.4 que a ferramenta utilizada para a usinagem desta amostra foi a que possuiu maior nível de desgaste,

relacionando-se portanto com o pior acabamento superficial e a maior rugosidade. Já a amostra 1SMF em todos os seus avanços apresentou o cavaco em lascas, o que foi refletido na baixa rugosidade encontrada para essa amostra, sendo então a amostra com melhor acabamento superficial.

Capítulo 5

Conclusões

O presente trabalho, que teve como objetivo a análise comparativa do comportamento das ligas com e sem memória de forma durante o processo de usinagem por torneamento permite concluir que:

- A composição química influencia nas temperaturas de transformação de fase redução da porcentagem de berílio retarda a transformação de fase de ligas Cu-Al-Be com memória de forma
- As ligas com memória de forma apresentaram maiores forças de corte durante os processos de usinagem. Entretanto, não foi possível observar um padrão de comportamento das forças de corte com a variação na composição química das ligas.
- As ligas com memória de forma apresentaram um comportamento regular em relação a pressão específica de corte, quando comparadas às ligas sem memória de forma, decrescendo com o aumento do avanço.
- A característica de memória de forma não foi um fator determinante para o tipo de cavaco gerado no torneamento. Contudo, as ligas com memória de forma apresentaram melhor qualidade de cavaco.
- A composição química das amostras foi o fator determinante para os tipos de cavacos obtidos, ou seja, para cada composição química foi observado um tipo específico de cavaco. Além disso, a adição dos elementos de liga Ni e Nb foram determinantes para a formação do cavaco mais deletério para o processo de usinagem, o cavaco em fita.
- As ligas com memória de forma apresentaram o menor nível de desgaste de flanco da ferramenta. Contudo, ambas as amostras (sem e com memória de forma) apresentaram trinca.
- Os menores valores de rugosidade para as ligas sem memória de forma foram obtidos para o avanço de 0,057 mm/rev e para as ligas com memória de forma não foi possível verificar um padrão.

- A presença dos elementos de liga NiNb foi prejudicial para o acabamento superficial para as amostras sem memória de forma, visto que tal amostra apresentou os maiores valores de rugosidade dentre as seis amostras.
- De modo geral, pelos resultados obtidos, a característica de memória de forma influenciou o comportamento das amostras quando comparadas em relação a força e a rugosidade. Apesar das amostras terem apresentado comportamentos diferentes, apenas nesses dois quesitos se observou grande variação.
- A composição química das ligas resultou em comportamentos diferentes em todos os casos analisados sendo que a adição dos elementos de liga Ni e Nb (ligas 3SMF e 3MF) agiram de forma negativa em ambas as condições (sem e com memória de forma), visto que de forma geral aumentaram a rugosidade da peça e geraram cavacos deletérios para o processo de usinagem.

Capítulo 6

Sugestão para trabalhos futuros

- Análise superficial para a identificação de poros, trincas e vazios decorrentes do processo de fundição.
- Análise metalográfica das amostras após o processo de usinagem.
- Análise das forças de avanço e passiva.
- Ensaio de dureza nas amostras após o tratamento de têmpera e comparação entre as ligas sem e com memória de forma.
- Variação na profundidade de corte para verificar variação da pressão específica de corte.

Referências Bibliográficas

- ABSI, M. Y. (2013). *Análise do Comportamento Termomecânico de uma Liga de Ni-Ti com Memória de Forma após Operação de Usinagem*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ALTINTAS, Y. (2000). *Manufacturing Automation*. New York: Cambridge University Press .
- CHENTOUF, S. N., BOUABDALLAH, N., CHENITI, H., EBERHARDT, A., PATOOR, E., SARI, A. (2010). *Ageing study of Cu-Al-Be hypoeutectoid shape memory alloy*. J. Materials Characterization. p. 1187-1193.
- CHUNG, C. Y., LAM, C. W. H., TAN, S. S. (1998). Cu-based shape memory alloys with Mn And Zr addition. *Materials Letter* , p. 291-296.
- DA SILVA, F. V. (2014) *Forças de Corte Geradas por Torneamento – Um Estudo de Caso das Ligas Cu-Al-Be e Cu-Al-Be-Nb-Ni Passíveis do Efeito Memória de Forma*. Paraíba: Universidade Federal da Paraíba.
- DINIZ, A. E., COPPINI, N. L., MARCONDES, F. C. (2013). *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Artliber.
- DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOSHER, R.A., (2003). *Materials and Processes in Manufacturing*, 9 edition, Hoboken: JohnWiley & Son.
- FERRARESI, D. (2000). *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. São Paulo: Edgard Bluncher Ltda.
- FIELD, M., F. KAHLES, J., CAMET, T., J. (1972). Review of Measuring Methods for Surface Integrity. Ohio: *Annals of the CIRP*, p. 219 - 238.
- FREMOND, M., MYAZAKI, Y. (1996). *Shape Memory Alloy* . Springer .
- GROOVER, M. P. (2014). *Introdução aos Processos de Fabricação*. LTC Editora.
- GRZESIK, W. (2008). *Advanced Machining Processes of Metallic Materials* . Elsevier .
- KENNEDY, H. F. (1987). *Shape Memory Alloys*. Gordon and Breach Science Publishers.
- LAGOUDAS, P. K. (2008). *Shape Memory Alloys*. Texas: Springer Science+Business Media.
- LIN, H. C., LIN, Y. C. (1999). *A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys*. *Materials Processing Technology*, p. 327 - 332.
- MACHADO, Á. R., ABRÃO, A. M., COELHO, R. T., da Silva, M. B. (2011). *Teoria da Usinagem dos Materiais*. São Paulo: Bluncher.
- MONTECINOS, S., SIMISON, S. (2010). *Kinetics of isothermal decomposition in polycrystalline β CuAlBe alloys*. *Intermetallics* , p. 36 - 41.

- PHADTARE, P. A., JOSHI, G.S., NAIK, V.R. (2016). *Machining of Shape Memory Alloys by using WEDM*. Kolhapur: IJRST –International Journal for Innovative Research in Science & Technology.
- RANGANATHA, M. K., SWAMY, S. P. (2012). Synthesis of Cu-Al-Be Shape Memory Alloys . *International Conference on Challenges and Opportunities in Mechanical Engineering* , p. 293 - 297.
- SHAW, J. A., KYRIAKIDES, S. (1995). *Thermomechanical aspects of Ni-Ti* . Journal of the Mechanics and Physics of Solids.
- SILVA, W. S. (2011). *Algumas aplicações de ligas com memória de forma*. Sinergia , p. 99 - 108.
- SILVEIRA, V. (2011). *Uma Contribuição ao Estudo do Torneamento em Eixo Comando de Motores de Ferro Fundido Cinzento*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- VELMURUGAN, C., SENTHILKUMAR, V., DINESH, S., ARULKIRUBAKARAN, D. (2018). *Machining of NiTi-shape memory alloys - A review*. Machining Science and Technology , p. 355 - 401
- YULIAN, E. T., ADESTA, M. A, (2010). *A Study of Parameters Relationship to Backcutting Phenomena During High Speed End Milling of AISI H13*. American Journal of Applied Sciences , p. 1420 - 1425.
- WAYMAN, K. e. (1998). *Shape Memory Materials*. Cambridge University Press.
- WEINERT, K., PETZOLDT, V., KOTTER, D. (2004). *Machining of NiTi based shape memory alloys*. Materials Science and Engineering, p. 180 - 184.