



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALURGICA**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO TORNEAMENTO DA LIGA  
ASTM A518 GR.3**

**GRÉGORI FOLIS DAGOSTIN**

**Criciúma/SC  
abril, 2023**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALURGICA**

**GRÉGORI FOLIS DAGOSTIN**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO TORNEAMENTO DA LIGA**  
**ASTM A518 GR.3**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica da UNISATC, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica.

Área de concentração: Processos de Fabricação ou Caracterização e seleção de materiais

Orientador: Luiz Carlos de Cesaro Cavaler

**Criciúma/SC**

**abril, 2023**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SATC - UNISATC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALURGICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA METALURGICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NO TORNEAMENTO DA LIGA  
ASTM A518 GR.3**

**GRÉGORI FOLIS DAGOSTIN**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Metalúrgica.

**Banca Examinadora**

Daniel Fritzen (Doutor) – UNISATC – Criciúma/SC

Alexandre Milanez (Doutor) – UNISATC – Criciúma/SC

Vilmar Menegon Bristot (Doutor) – IFSC Campus Criciúma/SC

**Suplente:**

Clauber Roberto Marques (Mestre) – UNISATC

**Criciúma/SC**  
**abril, 2023**

Dedico este trabalho a Deus primeiramente, a toda minha família, a minha esposa Lucieli, a minha filha Luísa e a todos que direta ou indiretamente auxiliaram na elaboração do mesmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A UNISATC, representada pelo Diretor Carlos Antônio Ferreira e Pró-Reitor Jovani Castelan, por me acolher nos últimos 22 anos de minha caminhada nos ensinos Fundamento, Médio, Técnico, Superior e Mestrado Profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação da UNISATC, representado pelo seu Coordenador Prof. Dr. Anderson Daleffe, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler, pela orientação e compartilhamento de conhecimento durante a realização do trabalho.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação da UNISATC, pela oportunidade de aprendizado concedida e o apoio a pesquisa e desenvolvimento de soluções voltadas para a indústria.

Ao meu amigo Sr. João Plínio Philippi, pelo grande apoio técnico durante a preparação do material para pesquisa e obtenção dos corpos de prova.

Aos fornecedores BFT Brasil® e Repatri®, pela disponibilidade de seu corpo técnico para acompanhamento dos ensaios preliminares até a definição e fornecimento dos insertos de corte, ferramentas e suportes definidos para este estudo.

A minha família, que não mediram esforços para me apoiar me dando suporte, coragem e sendo uma base muito importante para que este trabalho fosse executado.

“Mantenha seus pensamentos positivos, porque seus pensamentos tornam-se suas palavras. Mantenha suas palavras positivas, porque suas palavras tornam-se o seu comportamento. Mantenha o seu comportamento positivo, porque o seu comportamento torna-se seus hábitos. Mantenha seus hábitos positivos, porque seus hábitos tornam-se seus valores. Mantenha seus valores positivos porque seus valores tornam-se seu destino.”

Mohandas Karamchand Gandhi (1869-1948)

## RESUMO

Neste trabalho, buscou-se avaliar o estudo da usinabilidade de uma liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3 através do estudo da vida da ferramenta e a qualidade da superfície usinada com o intuito de avaliar a influência dos parâmetros de corte durante a operação de torneamento externo. Os corpos de prova foram obtidos através do processo de fundição por gravidade e encaminhados até um laboratório de usinagem, onde os ensaios de usinabilidade efetivamente foram realizados. Através de ensaios preliminares a este estudo, dois insertos de corte foram definidos para realização dos ensaios, o inserto WNMG 080408 MF BA0731 (fabricante BFT BURZONI®) e o inserto DNMG 150604 RK4315 (fabricante SANDVIK®). As variáveis de entrada determinadas foram a velocidade de corte ( $v_c$ ) 40, 50 e 73,5 m/min e os avanços de corte ( $f_n$ ) de 0,15 e 0,2 mm/rot, sendo fixado o valor da profundidade de corte ( $a_p$ ) para todos os ensaios com valor de 0,5mm. Com o objetivo de determinar a vida do inserto, seis configurações de corte foram aplicadas para cada inserto, sendo definido como critério de fim de vida da ferramenta o desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) no valor de 0,3 mm conforme norma ISO 3685. Foi considerada uma réplica do ensaio para cada configuração definida. Como variáveis de resposta, foram analisados os dados de tempo máximo de usinagem (T), taxa de remoção (Q) e rugosidade média ( $R_a$ ) encontrada para cada configuração dos parâmetros de corte e suas réplicas. Portanto, mediante a análise dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho, foi possível determinar que a melhor condição de corte para a liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3 foi a configuração  $v_c50f_n0,20$  aplicados ao inserto DNMG 150604 RK4315 no torneamento externo dos corpos de prova fabricados, utilizando como velocidade de corte ( $v_c$ ) o valor de 50 m/min, avanço de corte ( $f_n$ ) 0,20 mm/rot e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm. Quanto à Rugosidade média ( $R_a$ ), pode-se afirmar que todas as configurações de corte apresentaram resultados satisfatórios, visto que na grande maioria dos projetos de peças fabricadas neste material que solicitam torneamento externo a rugosidade máxima ( $R_a$ ) solicitada é de 6,35  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** Usinagem. Torneamento. Parâmetros de corte. ASTM A518 GR.3.

## ABSTRACT

In this work, we sought to evaluate the study of the machinability of a special alloy cast according to ASTM A518 GR.3 standard through the study of tool life and the quality of the machined surface in order to evaluate the influence of cutting parameters during machining. external turning operation. The specimens were obtained through the gravity casting process and sent to a machining laboratory, where the machinability tests were actually carried out. Through preliminary tests for this study, two cutting inserts were defined to carry out the tests, the WNMG insert 080408 MF BA0731 (manufacturer BFT BURZONI®) and the insert DNMG 150604 RK4315 (manufacturer SANDVIK®). The determined input variables were the cutting speed ( $v_c$ ) 40, 50 and 73.5 m/min and the cutting feeds ( $f_n$ ) of 0.15 and 0.2 mm/rev, being fixed the value of cutting depth ( $a_p$ ) for all tests with a value of 0.5mm. In order to determine the useful life of the insert, six cutting settings were applied to each insert, being defined as chosen at the end of tool life or flank wear ( $VB_B$ ) in the amount of 0.3 mm according to ISO 3685. One test replicate was considered for each defined configuration. As response variables, the maximum machining time (T), removal rate (Q) and average roughness ( $R_a$ ) data found for each configuration of the cutting parameters and their replicas were analyzed. Therefore, through the analysis of the results presented and discussed in this work, it was possible to determine that the best cutting condition for the special alloy cast according to the ASTM A518 GR.3 standard was the  $vc50fn0.20$  configuration applied to the insert DNMG 150604 RK4315 in the external turning of the specimens manufactured, using a cutting speed ( $v_c$ ) of 50 m/min, cutting feedrate ( $f_n$ ) of 0.20 mm/rev and cutting depth ( $a_p$ ) of 0.5 mm. As for the results of average roughness ( $R_a$ ), since in the vast majority of designs of parts manufactured in this material that require external turning the maximum roughness ( $R_a$ ) requested is 6.35  $\mu\text{m}$ , it can be said that all configurations of cutting followed positive results.

**Keywords:** Machining. Turning. Cutting parameters. ASTM A518 GR.3.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ferro fundido alto silício resistente à corrosão (0,9% C, 14,5% Si, 1,0% Mn, 4,5% Cr) como fabricado. Microestrutura composta por flocos de grafita dos tipos A e E (regiões escuras) distribuídas em matriz sólida cristalina (silício ferrita). (HNO <sub>3</sub> mais HF, em glicerol; X 100).....	21
Figura 2 - Operação de torneamento .....	23
Figura 3 - Elementos da ferramenta de corte .....	27
Figura 4 - Representação do ângulo de incidência, de cunha e de saída no plano normal .....	29
Figura 5 - Ângulos da ferramenta no plano de referência .....	29
Figura 6 - Classificação da forma dos cavacos .....	32
Figura 7 - Formação do cavaco no ferro fundido.....	33
Figura 8 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo .....	38
Figura 9 - Divisão dos custos de produção .....	40
Figura 10 - Formatos e Tipos de pastilhas utilizadas nos processos de usinagem...	41
Figura 11 - Principais causas de desgaste de ferramentas.....	44
Figura 12 - Representação esquemática do desgaste de flanco.....	46
Figura 13 - Representação esquemática do desgaste de cratera .....	47
Figura 14 - Representação esquemática do desgaste de entalhe .....	48
Figura 15 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte .....	50
Figura 16 - Representação do cálculo de medição para Rugosidade média $R_a$ .....	51
Figura 17 - Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta de ferramenta na rugosidade.....	53
Figura 18 - Dimensões do corpo de prova preparado para os ensaios de usinabilidade (todas as medidas em mm) .....	56
Figura 19 - Equipamento torno CNC modelo CENTUR 30S, fabricante ROMI® .....	58
Figura 20 - Conjunto de recursos utilizados para avaliação do desgaste do inserto (Microscópio digital USB, aumento de até 1000x).....	59
Figura 21 - Rugosímetro Portátil SurfTest SJ-310, Fabricante MITUTOYO® .....	60
Figura 22 - Parâmetros de corte e informações de geometria para o inserto WNMG 080408 MF BA0731 – Classe de material K .....	62

Figura 23 - Parâmetros de corte e informações de geometria para o inserto DNMG 150604 RK4315 – Classe de material K .....	63
Figura 24 - Relações de entrada e saída em torneamento .....	65
Figura 25 - Fluxograma do procedimento experimental .....	70
Figura 26 - Representação de fixação da peça na placa de 3 castanhas do torno CNC .....	72
Figura 27 - Sistema de fixação do corpo de prova, do suporte da ferramenta e do inserto de corte no torno CNC.....	73
Figura 28 - Estratégia de corte no torneamento externo .....	74
Figura 29 - Microscópio digital USB, aumento de até 1000x.....	75
Figura 30 - Rugosímetro Portátil SurfTest SJ-310, Fabricante MITUTOYO .....	76
Figura 31 - Corpo de prova bruto após ensaio não destrutivo de líquido penetrante	80
Figura 32 - (a) Aresta sem desgaste; (b) Aresta apresentando desgaste de flanco máximo $VB_{BMÁX}$ estipulado pela norma ISO 3685 .....	81
Figura 33 - Comportamento do desgaste de flanco $VB_{BMÁX}$ durante os ensaios de usinagem com o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK®.....	82
Figura 34 - Comportamento do desgaste de flanco $VB_B$ durante os ensaios de usinagem com o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI®....	83
Figura 35 - Vida da ferramenta (T) em relação aos parâmetros de corte $v_c$ (m/min) e $f_n$ (mm/rot) para os dois insertos utilizados .....	85
Figura 36 - Comportamento do comprimento de corte máximo ( $L_c$ ) e da vida da ferramenta (T) em relação aos parâmetros de corte $v_c$ (m/min) e $f_n$ (mm/rot).....	87
Figura 37 - Vida da ferramenta (T) e Taxa de remoção (Q) resultante em relação as configurações de corte $v_c$ e $f_n$ .....	88
Figura 38 - Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte $v_c$ e $f_n$ para o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK®.....	90
Figura 39 - Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte $v_c$ e $f_n$ para o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI®.	91
Figura 40 - Rugosidade média ( $R_a$ ), Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte $v_c$ e $f_n$ para o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK® .....	92
Figura 41 - Rugosidade média ( $R_a$ ), Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte $v_c$ e $f_n$ para o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI® .....	93

Figura 42 - Análise termográfica durante o ensaio de torneamento na configuração $v_c 73,5 f_n 20$ com o inserto WNMG 080408 MF BA0731. Temperatura ambiente no ato da medição: 21°C.....	94
Figura 43 - Imagem do MEV para o inserto DNMG 150604 RK4315. Inserto utilizado no ensaio de configuração $v_c 73,5 f_n 15$ .....	95
Figura 44 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 – Ponto MEV.....	96
Figura 45 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 no ponto P1078.....	96
Figura 46 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 no ponto P1079.....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das propriedades mecânicas e da resistência ao desgaste de algumas coberturas de ferramenta de corte.....	26
Tabela 2 - Parâmetros estudados no processo de torneamento.....	42
Tabela 3 - Composição química (% em peso) conforme norma ASTM A518 GR.3 ..	57
Tabela 4 - Informações e parâmetros de corte máximos obtidos nos testes preliminares.....	61
Tabela 5 - Variáveis de entrada para os ensaios de usinabilidade .....	66
Tabela 6 - Planejamento das configurações dos parâmetros de usinagem para os ensaios de usinabilidade. ....	67
Tabela 7 - Fatores de controle e os níveis adotados no planejamento experimental	68
Tabela 8 - Composição química da corrida de fabricação dos corpos de prova .....	78
Tabela 9 - Dureza dos corpos de prova, medição pelo processo Brinell.....	79
Tabela 10 - Comportamento do desgaste de flanco máximo $VB_{BMÁX}$ em relação aos parâmetros de corte utilizados para os dois insertos .....	84
Tabela 11 - Resumo dos parâmetros de corte e resultados obtidos para cada configuração dos ensaios de usinagem .....	98

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_p$	mm	Profundidade de corte
$Al_2O_3$		Óxido de Alumínio
$\beta_o$		Ângulo de cunha
C		Carbono
Cu		Cobre
Cr		Cromo
d		Distância máxima de corte
$\epsilon_r$		Ângulo de quina
$f_n$	mm/rot	Avanço
$HNO_3$		Ácido Nítrico
HF		Ácido Fluorídrico
$L_f$	mm	Comprimento de usinagem
KM	mm	Afastamento médio da cratera da ferramenta
Kr		Ângulo de direção
KT	mm	Profundidade da cratera da ferramenta
L	mm	Comprimento do corpo de prova
$L_c$	mm	Comprimento de corte total
Mn		Manganês
Mo		Molibdênio
Q	cm <sup>3</sup> /min	Taxa de remoção
$r_\epsilon$	mm	Raio de ponta
Ra	$\mu$ m	Desvio médio das amplitudes
Si		Silício
T	min	Tempo de vida da ferramenta
TiC		Carboneto de Titânio
TiCN		Carbonitreto de Titânio
TiN		Nitreto de Titânio
$T_{ve}$	min	Vida econômica da ferramenta
$T_p$	min	Tempo de corte efetivo por peça
$T_{vmaxpr}$	min	Vida da ferramenta para produção máxima
$v_c$	m/min	Velocidade de corte
$v_{c\ min}$	m/min	Velocidade econômica

$VB_B$	mm	Desgaste de flanco
$VB_B \text{ Máx}$	mm	Desgaste de flanco máximo
$V_{\text{max}}$	m/min	Velocidade de corte para máxima produção

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CVD	Deposição química de fase vapor ( <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
EDS	Varredura dispersiva de Energia ( <i>Energy Dispersive Scanning</i> )
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PVD	Deposição física de fase vapor ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
1.1 OBJETIVOS .....	18
1.1.1 Objetivo Geral .....	18
1.1.2 Objetivos Específicos .....	18
1.2 JUSTIFICATIVA .....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	20
2.1 FUNDAMENTOS DO MATERIAL EM ESTUDO .....	20
2.1.1 Ferro fundido com alto teor de silício.....	20
2.2 FUNDAMENTOS DA USINAGEM.....	22
2.2.1 Usinagem por torneamento .....	22
2.2.2 O processo de corte no torneamento .....	23
2.2.3 Influência do material da peça na usinagem .....	24
2.2.4 Influência do material da ferramenta na usinagem.....	25
2.2.5 Influência da geometria da ferramenta de corte na usinagem.....	27
2.2.6 Cavaco: Tipos e formas.....	30
2.2.7 Temperatura na usinagem .....	33
2.2.8 Refrigeração na usinagem de ferros fundidos.....	34
2.3 USINABILIDADE .....	35
2.3.1 Parâmetros de corte .....	36
2.3.2 Usinabilidade da liga ASTM A518 GR.3.....	39
2.4 FERRAMENTAS DE CORTE .....	40
2.4.1 Desgaste das ferramentas de corte .....	41
2.4.2 Vida da ferramenta em processo de usinagem .....	42
2.4.3 Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte.....	43
2.4.4 Tipos de desgaste da ferramenta de corte .....	45
2.4.5 Critérios de fim de vida de ferramenta de corte segundo norma ISO 3685.....	49
2.5 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE .....	50
3 METODOLOGIA.....	55
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL EM ESTUDO .....	55
3.1.1 Geometria dos corpos de prova .....	55
3.1.2 Composição química.....	56
3.1.3 Determinação da dureza .....	57



3.2 EQUIPAMENTOS .....	58
3.2.1 Máquina-ferramenta .....	58
3.2.2 Lupa digital .....	59
3.2.3 Rugosímetro portátil .....	60
3.3 FERRAMENTAS .....	60
3.3.1 Ensaio preliminares .....	60
3.3.2 Ferramentas selecionadas para o estudo de usinagem .....	62
3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	64
3.4.1 Definição das variáveis de entrada .....	65
3.4.2 Variáveis de resposta .....	67
3.4.3 Planejamento dos ensaios .....	68
3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	70
3.5.1 Fixação da peça (corpo de prova) .....	71
3.5.2 Fixação da ferramenta .....	72
3.5.3 Ensaio de usinagem .....	73
3.5.4 Programação CNC para usinagem .....	74
3.5.5 Medição do desgaste das ferramentas .....	75
3.5.6 Medição da rugosidade .....	76
3.5.7 Análise termográfica .....	76
3.5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	78
4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZAS OBTIDAS NOS CORPOS DE PROVA .....	78
4.2 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DOS INSERTOS .....	80
4.3 COMPORTAMENTO DO DESGASTE DE FLANCO MÉDIO ( $VB_B$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	81
4.4 VIDA DA FERRAMENTA (T) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	85
4.5 COMPRIMENTO DE CORTE TOTAL ( $L_c$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	86
4.6 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (Q) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	88
4.7 VOLUME USINADO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	90
4.8 RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE .....	92
4.9 ANÁLISE TERMOGRÁFICA .....	94

4.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) APLICADA NA REGIÃO DE DESGASTE DO INSERTO.....	95
4.11 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS.....	97
5 CONCLUSÕES.....	100
6 PESQUISAS FUTURAS.....	103
REFERENCIAS.....	104

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria metalúrgica é fundamental para o bom funcionamento de diversos mercados: construção civil, comunicação, tecnologia, automobilismo, entre muitos outros. Afinal, essas empresas são responsáveis pela extração, fabricação e tratamentos dos mais diversos tipos de metais [1].

De acordo com pesquisadores da Fundação Getúlio Vargas (FGV), a participação da indústria de transformação no PIB brasileiro em 2021 foi de 11,3% [2].

O setor metalúrgico apresenta expressiva importância no cenário econômico brasileiro, com vasta cadeia produtiva dos segmentos ligados à metalurgia, usinagem e produção de manufaturados metálicos, sendo base de outras atividades relevantes para o país, como a indústria automobilística, construção civil e bens de capital [3].

A usinagem possui ainda a peculiaridade de ser um processo essencialmente prático, mas envolvendo um número grande de variáveis, o que dificulta a previsão de comportamentos durante o processo. Nesse sentido, para que ocorra um aumento da performance econômica das operações de usinagem torna-se necessário o estudo de vida da ferramenta, forças de corte, potência consumida e superfície final [4].

A importância da remoção de materiais pela usinagem é verificada quando se considera o total dos custos associados a esta atividade, incluindo o custo despendido com ferramenta, mão-de-obra e todo o capital investido [5].

Em pesquisas científicas, o torneamento é a operação de usinagem mais comumente empregada em trabalhos experimentais sobre a investigação do comportamento tanto do material de trabalho quanto das ferramentas utilizadas no corte de metais segundo critérios de usinabilidade. Dentre as variantes do processo, o torneamento cilíndrico é o mais utilizado em investigações dos mecanismos fundamentais de formação do cavaco [6].

A maioria das indústrias de manufatura visa produzir um grande número de produtos em um tempo relativamente menor e, a alta demanda de produção e a alta qualidade das peças usinadas são os principais desafios da indústria de manufatura [7]. A liga fundida conforme norma ASTM A518 GR.3 a ser estudada nesta dissertação é amplamente utilizada na fabricação de peças para a indústria química. Uma das operações de usinagem que pode ser encontrada com maior frequência nas etapas de produção destas peças é o torneamento externo, sendo esta operação a escolhida para a realização do estudo de usinabilidade aqui apresentado.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é verificar a influência dos parâmetros de corte no torneamento de liga especial fundida conforme norma ASTM A518 Gr.3, através da determinação de variáveis de entrada ( $v_c$ ,  $f_n$  e  $a_p$ ) para o processo de torneamento e, análise de suas variáveis de respostas desejadas, tais como tempo de vida do inserto de corte (T), rugosidade média encontrada na peça ( $R_a$ ) e taxa de remoção de material do processo (Q), visando a obtenção de melhores resultados na usinagem por torneamento desta liga, que por sua vez possui um histórico de baixa usinabilidade e quebras frequentes de insertos de corte e até mesmo das peças a serem usinadas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar a liga a ser estudada neste trabalho para direcionar a escolha da geometria da ferramenta e das variáveis de entrada para o processo de usinagem por torneamento externo;
- ✓ Realizar ensaios preliminares para a obtenções de direcionamentos ao planejamento experimental do trabalho;
- ✓ Executar o processo de usinagem e aplicação das variáveis de entrada determinadas no processo de torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3 através do equipamento torno CNC para melhor controle dos parâmetros durante o processo e a garantir a padronização dos mesmos durante os ensaios;
- ✓ Correlacionar as variáveis respostas obtidas com os ensaios por meio de gráficos, analisando o comportamento das mesmas entre si e as possíveis interações entre as variáveis de entradas aplicadas;

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os principais aspectos e ocorrências dos desgastes em ferramentas estão geralmente associados à danificação casual do subsistema ferramenta-peça. A maioria dos estudos em desgastes de ferramentas preocupa-se com os desgastes e avarias na quina, no flanco (superfície de incidência) e na face (superfície de saída). Diferentes mecanismos são considerados como responsáveis por tais danos, destacando-se as falhas mecânicas (abrasão), as falhas térmicas (difusão, oxidação e deformação plástica) e a aderência [8].

Medir a vida da ferramenta com precisão terá grande influência nos custos finais da produção, evitando a perda do material utilizado na usinagem por poder prever quando a ferramenta irá falhar. Além disso, as empresas poderão ter um aumento na produção evitando que haja parada por falha da ferramenta e ainda ter uma maior qualidade nas peças usinadas [9].

Os ferros fundidos brancos e os ferros fundidos cinzentos de alto silício (14,5%) resistentes à corrosão são os ferros fundidos de pior usinabilidade [10].

O processo de fabricação por torneamento da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 Gr.3 possui um alto *leadtime* de fabricação, com elevados gastos com *set-up* e consumo excessivo de ferramentas devido ao desgaste e falhas catastróficas entre peça e ferramenta durante as operações de usinagem. A busca pelos altos índices de produtividade tem conduzido a maioria das empresas a adotar sistemas de manufatura integrados e flexíveis e problemas de quebras do subsistema ferramenta-peça podem levar a reduções drásticas da produtividade do processo de usinagem.

Desta forma, o trabalho em questão visa obter melhores condições de usinagem para a liga, bem como buscar os parâmetros de entrada que apresentem maior vida para o inserto, menor rugosidade e maior taxa de remoção durante o processo de usinagem por torneamento.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados assuntos relativos a liga de ferro silício conforme norma ASTM A158 GR.3 bem como conceitos gerais sobre usinagem e o processo de torneamento, o qual foi utilizado neste estudo, junto de suas principais características como a influência do material da peça, material da ferramenta, geometria da ferramenta, refrigeração entre outros. Posteriormente neste mesmo capítulo serão abordados conceitos de usinabilidade e acabamento da superfície de peças usinadas pelo processo de torneamento.

### 2.1 FUNDAMENTOS DO MATERIAL EM ESTUDO

Nesta etapa será apresentada a liga em estudo, a qual se trata de um ferro fundido cinzento com alto teor de silício, chamado popularmente de ferro silício, sendo ele padronizado através da norma ASTM A518 GR.3.

#### 2.1.1 Ferro fundido com alto teor de silício

De acordo com a norma ASTM A518 GR.3 [11], o material apresentado neste estudo, trata-se de uma liga popularmente chamada de ferro silício, contendo em sua composição aproximadamente 0,8% C, 15% Si, 0,7% Mn, geralmente apresenta o Cr em teores até 5,50% e, pertencem à família dos ferros fundidos.

Com uma grande quantidade de silício de 12 a 18 % (em peso), ferros fundidos passam a ser muito resistentes à corrosão ácida. Com um conteúdo de silício de 14,5 % (em peso) ou mais, estes ferros fundidos apresentam uma grande resistência a banho em ácido sulfúrico com concentração de 30%. Ferros fundidos alto silício com 16,5 % (em peso) são resistentes a banhos de ácido sulfúrico e nítrico em quase todas as concentrações [12].

Mesmo com o advento de novas ligas inoxidáveis, das superligas e dos materiais sintéticos resistentes à corrosão, as ligas de ferro silício mantêm o seu espaço em aplicações específicas, sem alternativas de material para sua substituição. Como exemplos de aplicação, entre outros, pode-se citar componentes de bomba para a indústria química e componentes de torres de concentração de ácidos [12].

Esses materiais são considerados os melhores, em relação ao custo. Empregam-se em indústrias químicas, na presença de meios medianamente corrosivos. Acima de 14,2% de silício, a resistência à corrosão em ácido sulfúrico em ebulição é elevada. Com adição de cromo e molibdênio e silício em torno de 17%, apresenta boa resistência à corrosão pela ação do ácido clorídrico. Resistem igualmente a soluções de ácidos orgânicos a quaisquer concentrações e temperaturas [13].

Estas ligas são cobertas por normas internacionais, e a mais utilizada é a ASTM A 518. A estrutura é constituída por solução sólida cristalina (silício-ferrita), com carbono livre na forma de grafita lamelar finamente distribuída, conforme demonstrado na Figura 1.

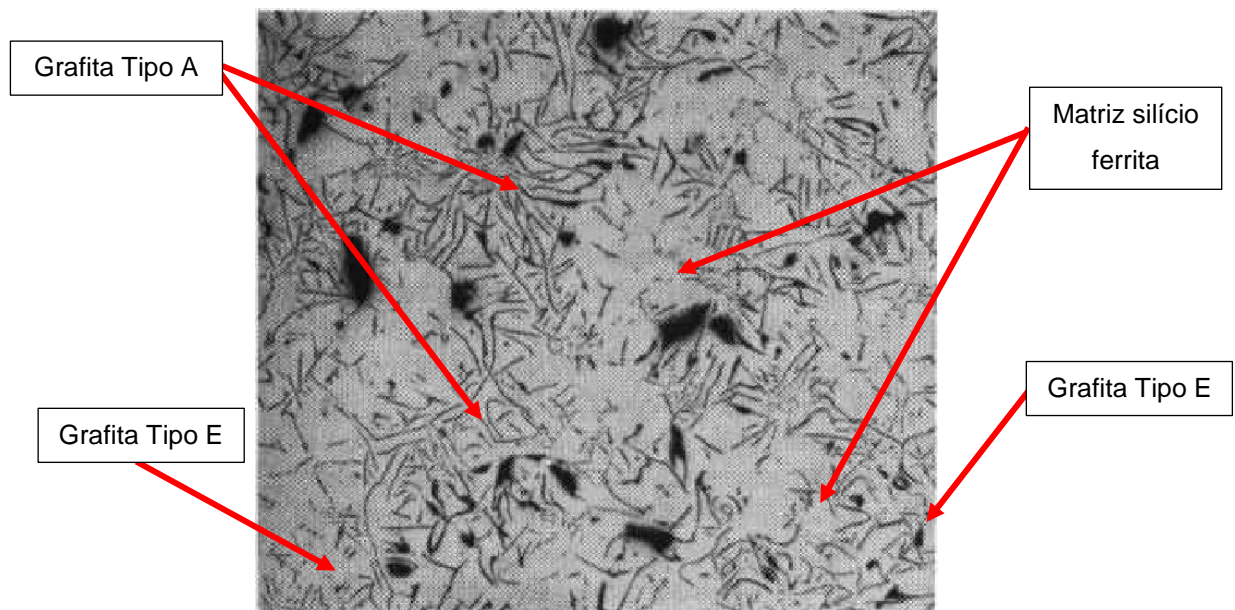


Figura 1 - Ferro fundido alto silício resistente à corrosão (0,9% C, 14,5% Si, 1,0% Mn, 4,5% Cr) como fabricado (HNO<sub>3</sub> mais HF, em glicerol; X 100).

Fonte: Adaptado de ASM Metals Handbook [14]

Devido à sua grande resistência à corrosão química, em um extenso campo de aplicação, estas ligas são materiais padrão na tecnologia química de ácidos em geral e também devido a sua grande resistência a abrasão, a qual está sempre associada à corrosão nos processos químicos industriais. As ligas de ferro silício resistem ao ataque de praticamente todas as concentrações de ácido sulfúrico em temperaturas de até 300°C, inclusive as concentrações mais agressivas na faixa de 10 a 30%.

Também para o ácido nítrico concentrado e seus vapores, a resistência à corrosão deve ser elevada, sendo, portanto, materiais indispensáveis na fabricação de ácido nítrico, fertilizantes e explosivos [15].

Quanto as suas propriedades mecânicas, devido ao alto teor em silício são consideradas ligas ruins, são duras e quebradiças: difíceis de fundir e de usinabilidade praticamente nula [12].

Esses materiais também são usados em tubos de drenagem de indústrias químicas, laboratórios, hospitais etc. Na indústria de fertilizantes e de explosivos, utilizam-se esses materiais para torres, tubos e dispositivos para concentração de ácido sulfúrico e nítrico. Empregam-se ainda em bombas, válvulas, bocais, para descarga de tanques etc., de equipamentos para manuseio de substâncias corrosivas como ácido crômico, lamas e outras substâncias corrosivas típicas de fábricas de papel e celulose, pigmentos, etc [13].

O silício é o elemento de liga mais importante para aumentar a resistência à corrosão de ferros fundidos [16].

## 2.2 FUNDAMENTOS DA USINAGEM

A usinagem é um termo que abrange processos de fabricação por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma à peça. Como operações de usinagem entendesse aquelas que, ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzindo cavaco [17].

Para o estudo do processo de usinagem, faz-se necessário o entendimento de alguns fundamentos principais do mesmo, bem como suas principais características e parâmetros envolvidos. A seguir, serão apresentados os principais fundamentos do processo de usinagem aplicado neste estudo.

### 2.2.1 Usinagem por torneamento

As operações de usinagem representam a maior classe de operações de manufatura atualmente, em que o torneamento é o processo de remoção de material mais comumente empregado [18]. No torneamento o material a ser cortado é fixado ao mandril de um torno e rotacionado, enquanto a ferramenta, presa firmemente em



um suporte, move-se em um plano que, idealmente, contém o eixo de rotação da peça conforme apresentado na Figura 2 [19].

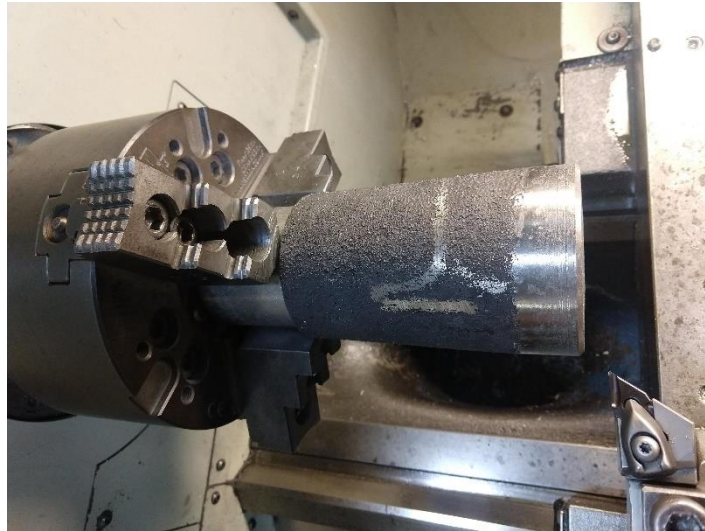


Figura 2 - Operação de torneamento  
Fonte: Autoria própria

Na usinagem, o torneamento é o que combina a rotação da peça junto ao eixo de trabalho do torno e o avanço da ferramenta conforme seja a necessidade de corte. Esse avanço sendo no sentido de centro da peça significa que seu diâmetro está sendo diminuído, e se o avanço for ao longo do eixo da peça significa que seu comprimento será reduzido [20]. Machado et al. [4] classificam a operação de torneamento em desbaste e acabamento. Na operação de desbaste, não há preocupação com a qualidade da superfície, pois a prioridade é a elevada taxa de remoção do material, enquanto na operação de acabamento é considerada a operação final, observando a qualidade final da superfície e as tolerâncias dimensionais da peça [4].

### **2.2.2 O processo de corte no torneamento**

Durante o processo de usinagem, uma fricção intensa é gerada na interface peça e ferramenta, e onde a menor condutividade térmica da liga resulta em deformação plástica severa na área local da peça devido à geração excessiva de calor. Este efeito juntamente com os resultados de endurecimento do trabalho na descolagem do substrato da ferramenta leva a um acabamento de superfície

deficiente, desgaste excessivo da ferramenta, maiores forças de corte, baixa produtividade e grande quantidade de consumo de energia [21].

O processo de corte no torneamento inicia-se quando a ferramenta penetra na peça, fazendo com que uma pequena porção do material seja deformada elástica e plasticamente, aumentando as tensões até que ocorra o cisalhamento do material e este escoe sobre a superfície da face da ferramenta, formando o cavaco [22].

É conhecido como processo de corte bidimensional ou ortogonal. As duas superfícies básicas da peça de trabalho consideradas neste processo são a superfície de trabalho e a superfície usinada. Enquanto isso, a face de saída e a face de flanco são as superfícies importantes da ferramenta de corte porque estão sujeitas ao desgaste durante a usinagem, o que afeta os custos da ferramenta de corte para reafiação e substituição e tempo de inatividade durante a substituição da ferramenta de corte cega [23]. Os fatores que apresentam grande influência sobre a força de corte são: a condição de corte, a geometria da ferramenta, e o material da peça e da ferramenta [24].

### **2.2.3 Influência do material da peça na usinagem**

Quando o material da peça tem afinidade química com o material da ferramenta, uma zona de aderência estável e forte será formada na área da seção de corte, aumentando o coeficiente de atrito na interface da ferramenta com a peça e, conseqüentemente, aumentando a força de corte. Entretanto, se não houver afinidade química, não existirão fortes ligações de aderência, o coeficiente de atrito será baixo e a força de usinagem reduzida [25].

De forma geral, quanto maior a resistência ao cisalhamento do material nos planos de cisalhamento, maior a força de usinagem, porém, baixa resistência pode vir acompanhada de elevada ductilidade, a qual pode aumentar a área da seção de corte aumentando a força [19].

Nem sempre o conhecimento do processo em si é suficiente. Também é importante o conhecimento das características do material a ser usinado, pois da mesma forma que o material influencia o projeto de determinado componente, também influencia o comportamento deste material ao sofrer algum processo de transformação, seja de origem térmica (fundição, tratamento térmico) ou mecânica (conformação, usinagem) [26].

Os ferros fundidos de alto silício são geralmente especificados de acordo com a norma ASTM A-518, havendo variações com designações particulares, geralmente com adições de cromo e molibdênio [16].

Dos ferros fundidos que utilizam silício, como elemento de liga (acima de 3%), destacam-se os nodulares com 4 a 5% Si (em peso), utilizados devido sua alta resistência à oxidação em temperatura elevadas, e os cinzentos de alto silício com 12 a 18% Si (em peso), utilizados devido à alta resistência à corrosão em meios ácidos [26]. Devido ao elevado teor de silício, esses ferros fundidos cinzentos de alto silício geralmente constituem-se de uma matriz ferrítica. Apresentam ainda, grafita lamelar e/ou carbonetos [27].

As quantidades de grafita e de carbonetos são variáveis dependendo do teor de carbono e de elementos de liga, bem como da velocidade de solidificação. É também comum observar nestas ligas uma grande quantidade de microporosidades nas regiões interdendríticas, geralmente caracterizáveis como microrrechupes [28].

Os altos conteúdos de silício endurecem por solução sólida e fragilizam a matriz ferrítica, promovendo a alta resistência à abrasão destas ligas e, ao mesmo tempo, provocando dificuldades de produção decorrentes de sua fragilidade. Os componentes fundidos apresentam uma elevada susceptibilidade a trincas, causadas pelas tensões residuais de fundição associadas à baixa tenacidade da liga [29].

Segundo Borba [30], o teor de silício da liga pode proporcionar partículas primárias mais duras que ocasionam desgaste por abrasão da ferramenta.

#### **2.2.4 Influência do material da ferramenta na usinagem**

Para Teles [31], é importante a escolha correta do tipo de material para a ferramenta, pois resultará numa análise cautelosa de vários fatores que atuam em conjunto, resultando num mecanismo complexo e difícil de ser quantificado [31].

Ferramentas de metal duro são amplamente utilizadas no processo de usinagem. O desenvolvimento de coberturas para essas ferramentas ampliou a utilização das mesmas, por garantir maior dureza e tenacidade, aumentando o desempenho dessas ferramentas [32].

Conforme afirmado por Diniz et al. [33], a grande maioria das pastilhas de metal duro, usadas na usinagem do ferro fundido possuem camadas de cobertura de espessura microscópica. Os principais materiais utilizados nestas coberturas são o carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. A finalidade destas camadas é aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e com a peça, sendo que o núcleo da pastilha permanece com a tenacidade característica do metal duro mais simples, composto por cobalto e carboneto de tungstênio.

De acordo com González et al. [34], o uso de revestimento nas ferramentas de corte tem como principais vantagens:

- Aumentar a resistência ao desgaste: devido ao baixo coeficiente de atrito e à estabilidade das partículas inseridas no metal duro;
- Diminuir o coeficiente de atrito para facilitar a saída do cavaco: reduzindo as forças de corte, evitando a aderência em superfícies de contato e reduzindo o calor gerado;
- Reduzir a energia térmica que flui pela ferramenta: após a aplicação de cobertura, as ferramentas apresentam baixa condutividade térmica, que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco, facilitando o corte e reduzindo as variações dimensionais por dilatação da peça usinada;

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as propriedades mecânicas de ferramentas com diferentes recobrimentos e sua resistência a desgastes, onde o símbolo (++) representa melhor propriedade mecânica ou melhor resistividade a desgaste que quando apresentado o símbolo (+).

Tabela 1 - Comparação das propriedades mecânicas e da resistência ao desgaste de algumas coberturas de ferramenta de corte

Cobertura	Efeito Barreira Térmica	Capac. de união com substrato	Coef. fricção	Desgaste de flanco	Desgaste de cratera	Tenacidade
TiC	+	++	++	++	+	++
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	++	+	+	+	++	+
TiN	++	++	++	+	+	++
TiCN	+	++	+	++	+	++

Fonte: Adaptado de González et al [34]

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com ferramentas revestidas, tendo maior aplicação os revestimentos a partir de nitreto de titânio (TiN). Esse composto possui variada gama de aplicação devido ao fato de possuir um bom balanço entre propriedades como: dureza, tenacidade, aderência (sobre o aço rápido e o metal duro), estabilidade química, estabilidade térmica e reduzido coeficiente de atrito [34].

A deposição da camada de revestimento se dá por dois processos: o PVD (*Physical Vapour Deposition*) e o CVD (*Chemical Vapour Deposition*). O CVD é amplamente utilizado para ferramentas de metal-duro, por ser um processo que permite uma boa difusão entre o revestimento e o substrato.

### 2.2.5 Influência da geometria da ferramenta de corte na usinagem

Segundo Machado e Silva [26] a geometria da ferramenta é um dos fatores de maior influência na usinagem.

As características de saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta, qualidade da superfície, entre outras, são diretamente influenciadas pela geometria cortante da ferramenta. Isto significa que se deve conhecer a definição de uma ferramenta de corte, suas partes, ângulos, tipos de materiais para sua fabricação, com o objetivo de obter um resultado satisfatório durante a usinagem, adaptando a geometria da ferramenta ao material da peça e ao material da ferramenta [22].

A Figura 3 mostra uma ferramenta de torneamento com a definição das superfícies, flancos e quinas.

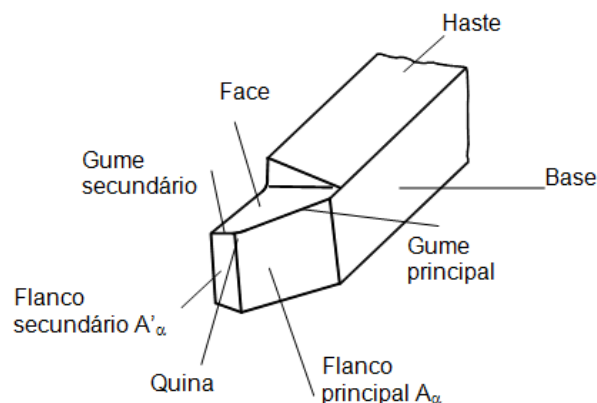


Figura 3 - Elementos da ferramenta de corte  
Fonte: Machado e Silva [26]

Segundo Weingaertner e Schroeter [36] no desenvolvimento de uma ferramenta, para assegurar um bom desempenho durante a usinagem, a sua geometria deve atender aos requisitos de projetos tais como, limitar o desgaste da ferramenta, reduzir os esforços e o atrito, obter superfícies de boa qualidade na peça e simplificar a afiação. Isso significa que a forma da ferramenta não é a mesma para todas as condições de corte. Ela depende de uma solução de compromisso entre as exigências, que muitas vezes são contraditórias.

Uma das maneiras de atender a essas exigências é trabalhar a variação dos valores dos ângulos que compõem a ferramenta. A dimensão destes influencia diretamente o processo de corte, no qual, uma variação pode significar melhora ou piora nos resultados obtidos na usinagem.

Conforme Stemmer [37], em uma ferramenta de corte de geometria definida, os principais ângulos são:

- Ângulo de incidência principal  $\alpha_0$ : influencia consideravelmente as características da usinagem. Se este for grande, a cunha é enfraquecida e pode ter acúmulo de calor, o que aumenta as chances de lascamento e quebra da ferramenta. Quando o mesmo tende a zero, o desgaste do flanco aumenta em decorrência dos caldeamentos;
- Ângulo de saída do cavaco  $\gamma_0$ : é o responsável pela saída do cavaco. Quando possui valor positivo, diminui a força de corte e a força de avanço, melhorando a qualidade da superfície. Se o ângulo possui valor negativo, é utilizado para usinar materiais que apresentam difícil usinabilidade, protegendo a ferramenta de impactos e reduzindo o calor do seu gume;
- Ângulo de cunha  $\beta_0$ : é o resultado da soma dos valores dos ângulos de incidência e de saída do cavaco diminuídos de  $90^\circ$ . Sendo assim, sua variação está diretamente relacionada à resistência mecânica da ferramenta (Fig. 4).

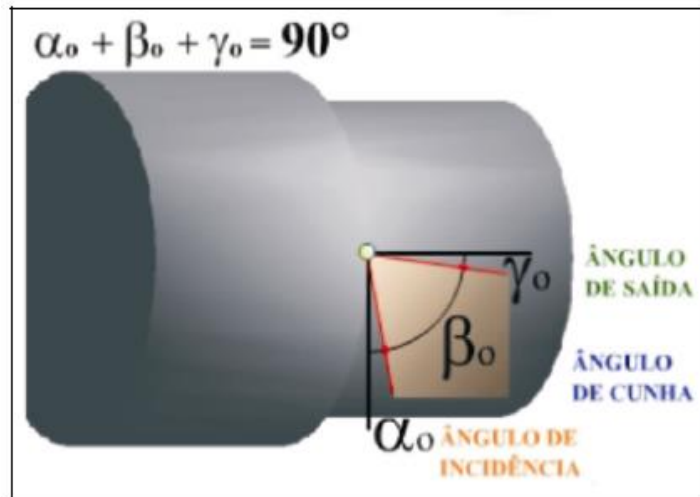


Figura 4 - Representação do ângulo de incidência, de cunha e de saída no plano normal

Fonte: CIMM [38]

- Ângulo de direção  $\kappa_r$ : é medido entre as superfícies de corte e de trabalho da ferramenta. Quando utilizado um valor menor que  $90^\circ$ , faz com que o corte inicie afastado da quina da ferramenta, incidindo os esforços de corte em um lugar mais resistente, apto a absorver o impacto inicial. Se mantido um valor igual a  $90^\circ$ , o corte se inicia subitamente em toda a extensão do gume principal, podendo provocar quebra ou lascamento do mesmo.
- Ângulo de quina  $\epsilon_r$ : é o responsável pela estabilização da cunha de corte e por direcionar a saída de cavaco. Protege a quina da ferramenta contra impactos e atenua vibrações (Fig. 5).

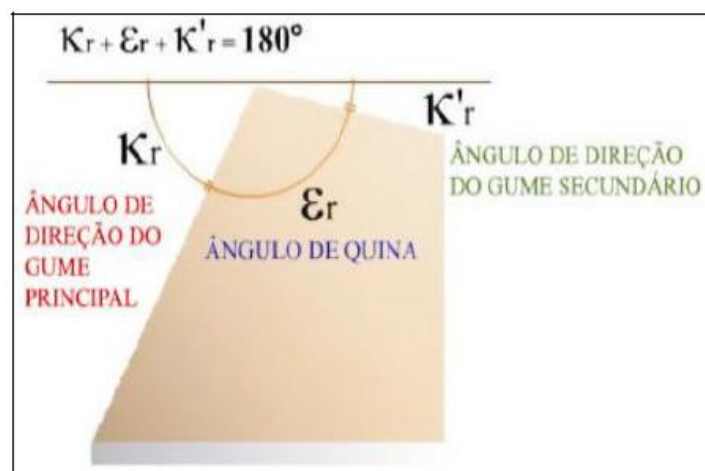


Figura 5 - Ângulos da ferramenta no plano de referência

Fonte: CIMM [38]

A redução do ângulo de saída tende a aumentar a área de contato cavaco-ferramenta aumentando a restrição ao movimento de escorregamento do cavaco sobre a superfície de saída, aumentando assim a força de usinagem [19].

Com relação à geometria da ferramenta, um ângulo ortogonal de saída maior, positivo, por exemplo, reduz o trabalho de corte. Com isso a temperatura diminui na zona primária de cisalhamento. Por outro lado, isso tende a diminuir a resistência mecânica da ferramenta, tornando-a mais suscetível a avarias [39].

Tratando-se das ferramentas de corte, Rodrigues [40] afirma que pequenas alterações dimensionais e angulares das mesmas causam respostas distintas quanto ao comportamento do material da peça sobre a aresta cortante. Ângulos de saída mais positivos ou geometrias de quebra-cavaco mais suaves favorecem o processo de remoção de cavaco, dependendo do material usinado.

### **2.2.6 Cavaco: Tipos e formas**

O cavaco é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem, pois é o subproduto final presente em todos eles. O cavaco pode variar (em tipo, forma, extensão) para cada operação de usinagem, ou mesmo em uma única operação, como por exemplo o torneamento, sendo o resultado final (forma, espessura) desta função de praticamente todas as variáveis envolvidas no processo [41].

A formação desse material pelo uso das ferramentas fabricadas em metal duro ou aço rápido, é definida a partir do momento em que uma quantidade de material ainda junto à peça sofre deformação plástica pela saída da ferramenta, que em seguida aumenta gradativamente, até o momento em que a tensão de cisalhamento fique grande, iniciando o deslize da matéria recalcada e a peça sem que aconteça o desprendimento. A medida em que a ferramenta vai adentrando na peça, acontecerá a quebra (cisalhamento) em partes ou na totalidade do cavaco, conforme a propriedade de ductilidade do material usinado [17].

Apesar de ser um subproduto da usinagem, o cavaco gerado pode ser ao mesmo tempo evidência e causa de problemas no processo de usinagem. Ou seja, ao mesmo tempo em que determinado tipo de cavaco pode causar algum problema, como danos à superfície da peça ou estar ocupando volume excessivo, a sua forma e tamanho podem ser indicativos de problemas, relativos tanto à qualidade do material usinado quanto às condições da ferramenta de corte utilizada [41].



Os tipos de cavaco são basicamente três, a saber;

- Cavaco contínuo, caracteriza-se pelo grande comprimento, independente da forma. Ocorre principalmente na usinagem de metais dúcteis (como aços baixa liga), sob pequenos e médios avanços, com altas velocidades de corte e grandes ângulos de saída da ferramenta. É formado quando o material é recalçado ao chegar na aresta de corte, sem que, no entanto, ocorra o rompimento deste, deslizando, então, pela superfície de saída da ferramenta.
- Cavaco de cisalhamento ou parcialmente contínuo, ocorre principalmente quando a trinca, ao propagar-se pelo plano de cisalhamento, provoca a ruptura total do cavaco, que, em seguida, é soldado devido à pressão e temperatura. O resultado final costuma ser um cavaco nem ininterrupto e uniforme nem fragmentado como o cavaco descontínuo, constituindo um meio termo entre os dois.
- Cavaco arrancado ou descontínuo, muito comum na usinagem de metais frágeis, como ferro fundido cinzento. Este tipo de cavaco ocorre também na usinagem de alguns materiais menos frágeis a baixas velocidades de corte, grandes avanços e com ângulo de saída pequeno.

Além da extensão do cavaco, também é possível diferenciá-lo quanto à sua forma. A importância desta diferenciação se deve ao fato de algumas formas de cavaco dificultarem a operação de usinagem, prejudicarem o acabamento da superfície da peça e desgastarem mais ou menos a ferramenta [41].

A classificação usual dada às formas de cavacos é a seguinte:

- Cavaco em fita;
- Cavaco helicoidal;
- Cavaco espiral;
- Cavaco em lascas ou pedaços.

A norma ISO 3685 faz uma classificação mais detalhada das formas de cavaco possíveis (Fig. 6).


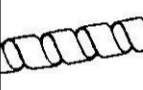







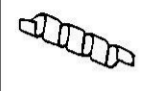


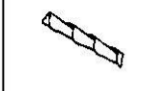

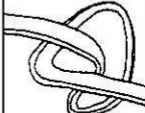

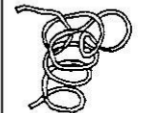

1 – Cavaco em fita	2 – Cavaco tubular	3 – Cavaco espiral	4 – Cavaco hel. tipo arruela	5 – Cavaco hel. cônico	6 – Cavaco em arco	7 – Cavaco fragmentado	8 – Cavaco tipo agulha
							
1 – 1 – Longo	2 – 1 – Longo	3 – 1 – Plano	4 – 1 – Longo	5 – 1 – Longo	6 – 1 – Conect.		
							
1 – 2 – Curto	2 – 2 – Curto	3 – 2 – Cônico	4 – 2 – Curto	5 – 2 – Curto	6 – 2 – Solto		
							
1 – 3 – Emaranhado	2 – 3 – Emaranhado		4 – 3 – Emaranhado	5 – 3 – Emaranhado			

Figura 6 - Classificação da forma dos cavacos

Fonte: ISO 3685 [42]

Na usinagem do ferro fundido, o cavaco é influenciado pela forma da grafita. No ferro fundido cinzento, durante a usinagem, a ferramenta primeiro comprime o material, como as suas grafitas possuem lamelas afiadas, ocorre uma concentração de tensão nas suas extremidades, e devido ao fato de elas serem interconectadas, cria-se um plano de propagação de trincas à frente do gume (Fig. 7a). Com o avanço da ferramenta, o material é removido completamente com uma menor força de corte (Fig. 7b). Durante a usinagem, a ferramenta de corte não está sempre em contato com o material, pois uma porção de material é removida à frente da ferramenta, gerando crateras (Fig. 7c). O arrancamento de material contribui para a liberação da grafita que age como lubrificante e piora a rugosidade da superfície usinada (Fig. 7d) [43].

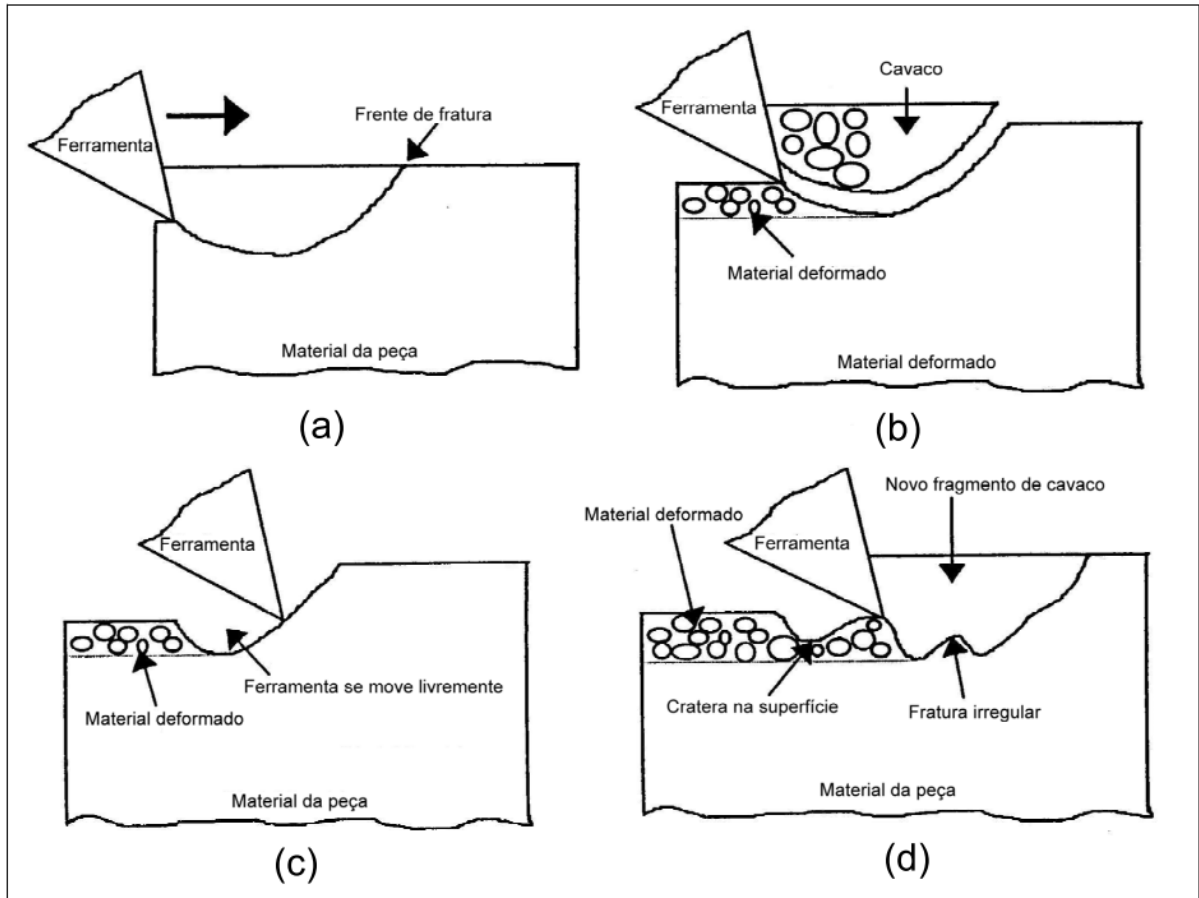


Figura 7 - Formação do cavaco no ferro fundido  
Fonte: Cohen [43]

Conforme apresentado por Reuter et al. [44], no ferro fundido cinzento, as grafitas na forma de lamelas possuem em suas extremidades arestas muito “vivas”, que agem como pontos de concentração de tensões. Então, durante o processo de corte, a ferramenta comprime o material e, como as grafitas em forma de lamelas são interligadas, trincas se propagam em um plano de corte até o arrancamento do cavaco. Portanto, o cavaco não fica o tempo todo em contato com a ferramenta. Isso, aliado ao maior coeficiente de atrito do ferro fundido cinzento e sua menor condutividade térmica, tende a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte, contribuindo para o maior desgaste desta.

### 2.2.7 Temperatura na usinagem

Os fenômenos de geração e dissipação de calor na operação de usinagem são complexos, e as temperaturas alcançadas durante o corte provocam alterações nas

propriedades físicas e mecânicas, as quais aceleram o desgaste da ferramenta, provocando mais atrito e, conseqüentemente mais calor, elevando, mais uma vez, a temperatura, e assim definindo um círculo vicioso que limita o uso da ferramenta de corte [4].

Para velocidades de corte baixas e moderadas, é importante entender os fatores que influenciam a geração de calor, seu fluxo e a distribuição de temperatura na ferramenta, no cavaco e na peça próximo à aresta de corte por dois motivos: (i) a temperatura afeta as propriedades mecânicas do material da peça e, por consequência, a interação das forças entre ferramenta e peça; (ii) a temperatura tem uma considerável influência no desgaste da ferramenta, tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga. Em muitos casos, constituintes da ferramenta podem difundir-se para dentro do cavaco ou reagir quimicamente com a peça, ou fluido de corte, devido às altas temperaturas [45].

A combinação entre as altas temperaturas e pressões que ocorrem na aresta de corte da ferramenta podem causar inclusive a soldagem de material da peça na aresta cortante, gerando o fenômeno conhecido como aresta postiça de corte (*built up edge*), que geralmente é danoso ao processo [46].

Existem, portanto, limites para a velocidade de corte e para o avanço devido a elevadas temperaturas na ferramenta. O aumento da temperatura na região de corte também causa dilatação térmica na peça, afetando sua dimensão durante a usinagem. Esse fato pode prejudicar a precisão dimensional inviabilizando o processo de usinagem. Esse fato é particularmente observado em operações de usinagem por abrasão ou quando altas velocidades de corte são usadas em processos de corte contínuo, como o torneamento. A temperatura da ferramenta pode não ser considerada o maior problema quando na usinagem de materiais macios e de baixo ponto de fusão, como o alumínio e o magnésio, mas se torna o fator controlador da taxa de remoção de material, quando na usinagem de materiais duros e de alto ponto de fusão, como ferros fundidos, aços, ligas de níquel e ligas de titânio [45].

### **2.2.8 Refrigeração na usinagem de ferros fundidos**

Uma das maneiras de se minimizar os efeitos dos tempos improdutivo causados pelos desgastes das ferramentas, pode ser alcançado pela introdução de sistemas de lubrificação e refrigeração eficientes no processo. Porém, na última

década, as pesquisas tiveram como meta restringir ao máximo o uso de fluidos refrigerante e/ou lubrificante na produção metal mecânica. Os fatores importantes que justificaram esse procedimento incluem os custos operacionais da produção, as questões ecológicas, as exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano [46].

Enquanto a ação lubrificante do fluido de corte atua no sentido de diminuir os esforços através da redução do atrito entre cavaco e ferramenta, a ação refrigerante causa um aumento na resistência ao cisalhamento do material da peça, devido à redução de temperatura o que, conseqüentemente, leva ao aumento dos esforços. Logo, a ação positiva ou negativa do fluido de corte está condicionada à ação predominante deste sobre o processo de corte [26].

São cada vez mais frequentes os argumentos a favor da usinagem de materiais sem uso de fluido de corte, tendo conseqüentemente crescido o interesse pelo torneamento sem refrigeração através do desenvolvimento de modernas pastilhas, permitido o torneamento de materiais com alta dureza, com alta desempenho, sem o uso de fluidos de corte [47]. As vantagens da usinagem a seco são custo menor, meio ambiente saudável, melhor segurança do trabalhador, proteção contra efeitos químicos, isenção de sistema de bombeamento, isenção de coleta e filtração, não necessidade de armazenamento, etc [48].

O ferro fundido cinzento pode ser usinado a seco, propiciando melhores resultados, ou com ar (às vezes com aspiração do cavaco), para evitar danos à máquina-ferramenta [33]. Geralmente a usinagem do ferro fundido cinzento é realizada a seco [49].

## 2.3 USINABILIDADE

De acordo com Ferraresi [17], a usinabilidade de um metal é definida como sendo uma grandeza tecnológica, que expressa, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão, ou seja, indica o grau de dificuldade de se usinar um material.

Segundo Weingaertner et al. [50] a usinabilidade de metais é, normalmente, analisada com relação a quatro critérios: qualidade da superfície, formação de cavacos, vida da ferramenta e forças de corte. Nesse aspecto, a usinabilidade exerce forte influência sobre a produtividade e o custo final de produção e serve como

parâmetro para reforçar a necessidade da preocupação não só de materiais com propriedades mecânicas, físicas e químicas superiores, mas também com o comportamento destes materiais quando submetidos a algum tipo de processo de fabricação.

Pode-se afirmar de acordo com Trent e Wright [19] que a usinabilidade não é uma propriedade do material, mas o "modo" como o material se comporta durante o corte.

A usinabilidade, além de depender das propriedades mecânicas (resistência, tenacidade, ductilidade e dureza), composição química, microestrutura, tendência de "empastamento" do cavaco na superfície de saída da ferramenta, quantidade de partículas duras, inclusões e aditivos para melhorar a usinabilidade, operações anteriores realizadas sobre o material (a frio ou a quente) e do eventual grau de encruamento é também função das condições do processo empregado [33].

Por ser uma propriedade comparativa, a usinabilidade depende também de muitas variáveis do processo de usinagem. Conseqüentemente, por causa dos critérios diferentes de usinabilidade e pelas muitas variáveis do processo de usinagem, a classificação ou a extrapolação da usinabilidade devem ser vistas com cuidado [51].

A usinabilidade não é uma propriedade intrínseca de um material, mas sim o resultado de interações complexas entre a peça e vários dispositivos de corte operados em diferentes parâmetros de processo e sob diferentes condições de lubrificação [23].

Existem, no torneamento, dois fatores cuja influência (independente de material de peça e ferramenta) determina o resultado final do processo: os parâmetros de corte e a geometria da aresta de corte [26].

### **2.3.1 Parâmetros de corte**

Especificamente, nos processos de usinagem, a otimização dos parâmetros de corte já vem sendo realizada há muito tempo, baseada principalmente na redução do tempo de fabricação, que é conseguido com a utilização da ferramenta correta, utilização de avanços e profundidades de corte coerentes com a capacidade da máquina.

Para cada operação de usinagem é necessário definir quais serão os parâmetros de corte utilizados. Muitos fatores vão de encontro a tais decisões, pois todas as variáveis dependentes são influenciadas por elas. Entre os parâmetros de corte, a velocidade de corte ( $v_c$ ) Eq.(1) é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte da ferramenta, expressa normalmente em m/min.

$$v_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

$v_c$  = Velocidade de corte (m/min);

$\pi$  = Constante (3,1415);

$D$  = Diâmetro da peça (mm);

$n$  = Rotação (rpm);

O avanço ( $f_n$ ) é a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça, e a profundidade de corte ( $a_p$ ) é a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e  $v_c$  da ferramenta [26].

A otimização da velocidade de corte também permite a obtenção de uma maior taxa de remoção de cavaco e conseqüentemente, reduz o tempo de usinagem. Entretanto, o aumento da velocidade de corte tem um efeito negativo sobre a vida da ferramenta, o que pode provocar o aumento do tempo de usinagem, devido à necessidade de trocas mais frequentes de arestas de corte das ferramentas.

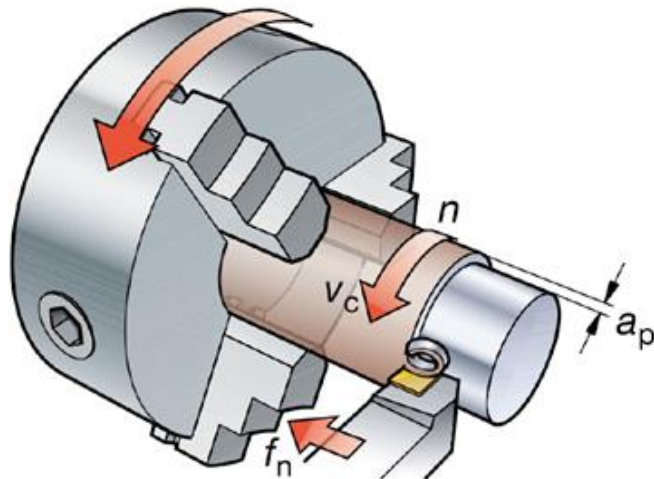


Figura 8 - Parâmetros de corte e superfícies em torneamento cilíndrico externo  
Fonte: Coromant [53]

A partir destes três parâmetros (Fig. 8) é possível determinar a taxa de remoção de material (Q) Eq. (2), parâmetro usado para a medição da eficiência da operação de usinagem.

$$Q = v_c \times f_n \times a_p \quad (2)$$

Onde:

Q = Taxa de remoção (cm<sup>3</sup>/min)

$v_c$  = Velocidade de corte (m/min);

$f_n$  = Avanço (mm/rot);

$a_p$  = Profundidade de corte (mm);

A seleção apropriada destes parâmetros depende também de outras variáveis de entrada que devem ser escolhidas com antecedência a execução da operação: A quantidade de material removido; os materiais da peça e da ferramenta; e as operações de corte envolvidas [19].



### 2.3.2 Usinabilidade da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3

Os ferros fundidos cinzentos ferríticos são de fácil usinabilidade. Já os ferros fundidos brancos são difíceis de usinar, sendo os de pior usinabilidade, juntamente com os ferros cinzentos de alto teor de silício (14,5%) quando comparados com dos ferros fundidos cinzentos [54].

A fabricação de peças nestas ligas apresenta uma série de problemas associados com fragilidade, tendência a trincas, porosidade, usinabilidade difícil, dificuldade/impossibilidade de soldagem, problemas estes que exigem aprimorada tecnologia em todas as etapas de fabricação para serem contornados [15].

A ferrita é essencialmente um constituinte livre de carbono. Com a exceção da grafita, a ferrita tem a dureza mais baixa que qualquer constituinte do ferro. Entretanto, a dureza não é tão baixa quanto a da ferrita de aços de baixo carbono, porque no ferro fundido, a ferrita contém silício. O efeito moderado de dureza do silício dissolvido promove à ferrita facilidade de corte. Isto deve-se ao fato que, este elemento, nas usuais taxas de 1,5% a 3,0% afeta muito pouco a vida da ferramenta. O mesmo já não ocorre em ferros fundidos especiais com altas taxas de silício na ordem de 14%, os quais são completamente de difícil usinabilidade [55].

Conforme Smith [12], devido ao seu alto conteúdo de silício, estas ligas apresentam propriedades mecânicas ruins como baixa resistência ao choque térmico e mecânico, sendo difíceis de vazar e são não usináveis.

Ainda segundo Kennametal [10], a propriedade de usinabilidade dos ferros fundidos pode ser significativamente melhorada com o aumento do teor do silício, que mostra redução clara na variação da dureza, mesmo em peças com diferentes espessuras, a qual, conforme já visto, em valores altos é extremamente prejudicial.

A usinagem convencional das ligas resistentes a altas temperaturas é feita com ferramenta de metal duro, classe K, com tempos de vida das ferramentas relativamente pequenos, em virtude das sobrecargas térmicas e mecânicas elevadas. As velocidades de corte, dependendo do material da peça, ficam entre 30 a 60 m/min. No entanto, arestas de corte com cantos vivos possibilitam o cisalhamento fácil dos cavacos, reduzindo a tendência ao encruamento do material [56].

## 2.4 FERRAMENTAS DE CORTE

De acordo com uma pesquisa da U.S. Cutting Tool Institute (USCTI) e da AMT – The Association For Manufacturing Technology, o consumo de ferramentas de corte nas indústrias norte-americanas totalizaram, somente em abril de 2021, US\$170 milhões [57]. Para se ter uma ideia, estima-se que no final da vida útil de um equipamento de usinagem, cerca de 7 a 10 vezes do seu valor inicial será gasto com ferramentas. Existem alguns gastos que são inevitáveis: não é possível não investir nos ferramentais certos que permitem a operação de processos de usinagem. Porém, existem outros que podem ser evitados, principalmente no que diz respeito à vida útil das ferramentas de corte.

O custo efetivo com ferramentas de corte, conforme Boehs e Castro [58] pode representar uma parcela que varia entre 3% a 5% do custo total do processo de fabricação de um produto final típico da área de engenharia mecânica.

Os custos envolvidos no processo de usinagem são divididos entre ferramentas, equipamento, fluidos de corte (quando utilizado) entre outros. A Figura 9 mostra a parcela do custo de usinagem que cabe a cada parte.

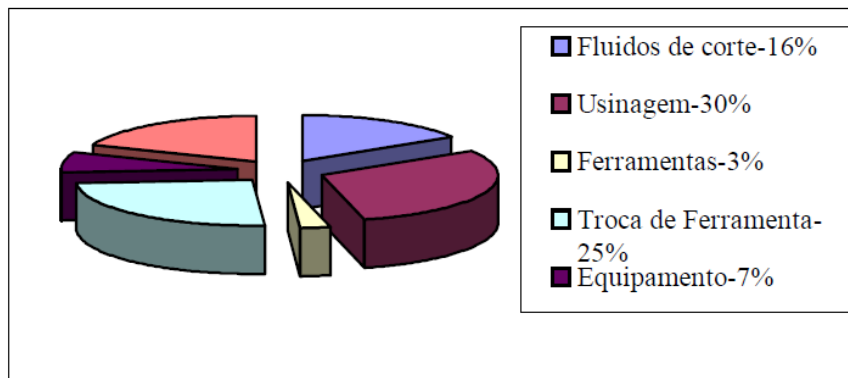


Figura 9 - Divisão dos custos de produção

Fonte: adaptado de Kopac [58]

Nos processos de torneamento, são encontradas diferentes modelos e formas geométricas de pastilhas conforme a Figura 10 sendo cada uma definida para atender determinada finalidade, além de sistemas de fixação. As pastilhas podem ser classificadas em face simples ou dupla, com quebra ou não de cavaco e por tipo [58].

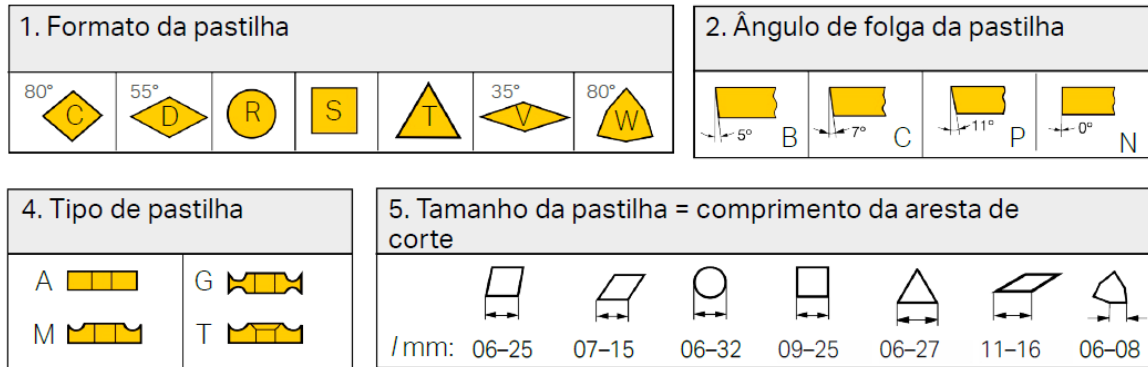


Figura 10 - Formatos e Tipos de pastilhas utilizadas nos processos de usinagem

Fonte: adaptado de ISO [59]

Não existe material de ferramenta que suporte integralmente por muito tempo os efeitos inerentes ao processo de usinagem. As ferramentas de corte devem suportar muita fricção, tensões normais e altas temperaturas. Na usinagem, o modo de dano à ferramenta e a taxa de desgaste são muito sensíveis às mudanças das condições de corte. O desgaste da ferramenta pode não ser evitado, mas pode ser reduzido se os mecanismos de sua ocorrência forem bem entendidos [60].

#### 2.4.1 Desgaste das ferramentas de corte

Segundo Mills e Redford [61], existem 5 mecanismos básicos de desgaste de ferramenta: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste difusivo, desgaste causado por ação eletroquímica e desgaste por fadiga superficial.

Entretanto, Hastings e Oxley [61] e Opitz e König [63] sugeriram que os mecanismos predominantes de desgaste (com velocidade e temperatura correspondentes) em baixas velocidades e temperaturas de corte são os da abrasão, seguidos pela adesão por velocidades e temperaturas e difusão em altas velocidades e temperaturas [64].

Portanto, o desgaste da ferramenta de corte se torna um fator importante durante o processo de usinagem. Além disso, se uma ferramenta desgastada não for identificada com rapidez suficiente, poderá ocorrer uma degradação significativa da qualidade da superfície [65], da precisão dimensional e, portanto, um aumento nos custos de fabricação. É necessário medir o desgaste, bem como a compreensão dos mecanismos de desgaste na ferramenta de corte. O desgaste na ferramenta é

classificado como desgaste do flanco, caracterização da superfície de ataque, desgaste do nariz e *lascamentom* [66].

Na prática, o desgaste do flanco é o mais utilizado na determinação da vida da ferramenta. O desgaste do flanco é devido ao desgaste adesivo ou abrasivo causado pelas fases endurecidas do material da peça [67].

#### 2.4.2 Vida da ferramenta em processo de usinagem

Uma definição para a vida de uma ferramenta está relacionada ao tempo efetivo gasto pela ferramenta na execução de uma operação, sem alterar sua função de corte e que tenha seus critérios de tempo até a falha já determinados. Chegando ao limite desses critérios, indica que a ferramenta deverá ser trocada ou ser reafiada [68].

Durante o processo de usinagem, ocorre mudança na forma da ferramenta e, portanto, a geometria original altera-se, caracterizando o desgaste progressivo da ferramenta. Segundo Xavier [69], durante a usinagem, a ferramenta de corte está sujeita a diferentes tipos e intensidades de solicitações térmicas, mecânicas e químicas.

Para Dieter [70], a vida da ferramenta pode ser calculada baseada na degradação do acabamento da superfície, até atingir um valor admissível.

As falhas na ferramenta de corte, ocasionadas por desgastes (contínuos) ou avarias (aleatórias), influenciam diretamente na qualidade do produto, afetando significativamente o tempo até a falha [71].

De acordo uma pesquisa bibliográfica realizada por Silva e Ferreira [72], para analisar quais parâmetros estão sendo estudados na operação de torneamento, conforme a Tabela 2, os parâmetros mais analisados são velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem juntamente com a geometria da ferramenta de corte, com o objetivo de melhorar a vida da ferramenta de corte, a taxa de produção e o custo.

Tabela 2 - Parâmetros estudados no processo de torneamento

Referências	Fatores Analisados								
	Parâmetros			Geometria da Ferramenta				Refrigeração	
	$V_c$	$f_n$	$a_p$	Raio Ponta	Quebra Cavaco	Ângulo Ataque	Ângulo Folga	Tipo	Taxa
Pérez et al. (2003)	x	x	x						

Noordin et al. (2004)	x	x					x		
Ferreira et al. (2007)	x	x	x						
Isik (2007)	x	x	x						
Camuscu et al. (2007)	x	x	x						
Nalbant et al. (2007)		x	x	x					
Singh et al. (2007)	x	x		x	x				
Paiva et al. (2008)	x	x	x						
Aggarwal et al. (2008)	x	x	x	x					
Lalwani et al. (2008)	x	x	x						
Chiang et al. (2008)	x	x	x	x					
Sharma et al. (2008)	x	x	x						
Xueping et al. (2009)	x	x	x						
Yang et al. (2009)	x	x	x						x
Xavior et al. (2009)	x	x	x					x	
Yaldiz et al. (2011)				x		x	x		

Fonte: Adaptado de Silva e Ferreira [72]

Segundo Miranda [73], a vida da aresta de corte está diretamente relacionada com as características de cada processo, as condições de usinagem empregadas (velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e geometria da ferramenta) e as variações das características do material usinado.

Durante o processo de usinagem, levando-se em conta as condições de corte, o fator que é mais significativo para a vida da ferramenta é a velocidade de corte, pelo fato de ser ela a principal causadora da progressão do desgaste. Em seguida tem-se o avanço e por último a profundidade de corte [33].

### 2.4.3 Mecanismos de desgaste em ferramentas de corte

Segundo Zeilmann et al. [74] os problemas de desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, devido ao controle dimensional e a necessidade de parada no processo para troca das ferramentas. Isso significa custos adicionais e perda de produtividade.

São vários os fenômenos causadores do desgaste na ferramenta, sendo predominante o desgaste de flanco, desgaste de cratera, aresta postiça de corte, bem

como outros. Há diversos mecanismos de desgastes básicos na usinagem dos materiais dentre eles pode-se citar a abrasão, difusão, oxidação e adesão [33].

Consideram-se três causas básicas responsáveis pelos danos em ferramentas, quais sejam: (i) danos à ferramenta devido à adesão, (ii) os causados por origem mecânica e (iii) danos de origem térmica. Os danos causados por origem mecânica são avarias ou desgastes. Nessa categoria, inclui-se a abrasão. Por sua vez, os danos de origem térmica incluem a difusão, o desgaste por corrente elétrica e a oxidação, pois estes são fenômenos intensificados pelo aumento da temperatura [60]. De acordo com Machado et al. [4], os principais mecanismos de desgaste em ferramentas podem ser observadas na Figura 11 a seguir.

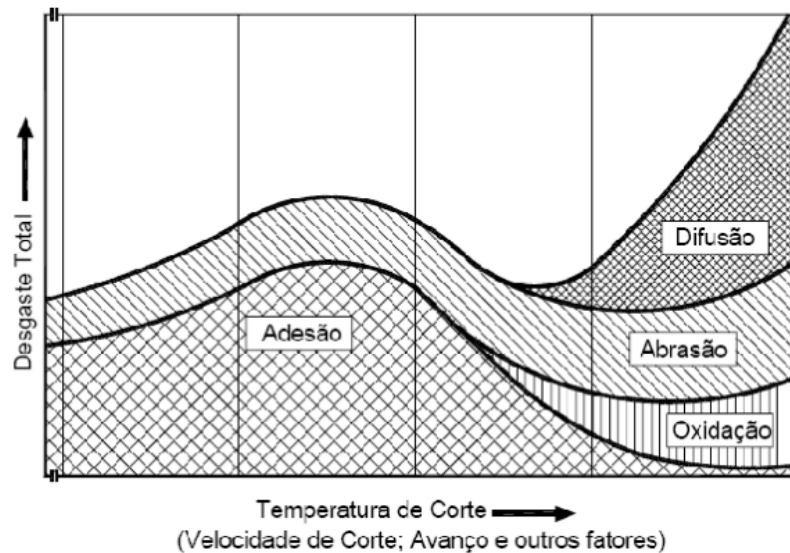


Figura 11 - Principais causas de desgaste de ferramentas  
Fonte: Machado et al. [4]

Ainda de acordo com Machado et al. [4], existem variações na classificação dos mecanismos de desgaste.

A abrasão mecânica é uma das principais causas de desgaste da ferramenta, tanto o desgaste de flanco como o de cratera, podem ser gerados pela abrasão, porém, ela se faz mais presente no desgaste frontal, onde a superfície de folga atrita com o elemento rígido, a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com o elemento flexível que é o cavaco. O desgaste gerado pela abrasão é induzido pela presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta [33].

A difusão ocorre durante o processo de remoção de material, forma-se na superfície de saída da ferramenta um tipo de desgaste chamado desgaste de cratera, que é a principal manifestação do fenômeno da difusão. Este fenômeno se desenvolve pelo arrancamento de grãos microscópicos da superfície da ferramenta devido à ativação da migração atômica no par ferramenta-peça [33]. Segundo Borba [30], para os metais duros, pode ocorrer migração de componentes entre o material da peça e o da ferramenta, mudando a estrutura ou dissolução de carbonetos no cobalto em temperaturas entre 700 e 1.300 °C.

A presença de altas temperaturas, ar e água geram oxidação para a maioria dos metais. Este mecanismo ocorre principalmente na região onde a terna temperatura-ar-água está presente, ou seja, nas regiões do final da profundidade de usinagem, tanto na superfície primária quanto na secundária de folga. A principal manifestação da oxidação é o desgaste chamado entalhe. O entalhe, localizado no fim do corte é resultado das tensões cíclicas que ocorrem nesta região, seja em corte interrompido ou em contínuo [33].

Outro mecanismo que pode estar presente nesta classificação é o mecanismo de aderência ou adesão. Este mecanismo ocorre quando duas superfícies são colocadas em contato sob cargas moderadas e velocidade relativa suficiente para que, através da deformação das superfícies de ambas, ocorra a formação de um extrato metálico na interface, unindo momentaneamente os dois materiais.

Em um momento subsequente à esta adesão, ocorre, através da continuidade do movimento relativo, a ruptura desta união, na região de menor resistência ao cisalhamento [5].

#### **2.4.4 Tipos de desgaste da ferramenta de corte**

O tipo de desgaste depende da geometria e do material da ferramenta, da composição química e das propriedades mecânicas do material da peça e das condições de usinagem, associado às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco ferramenta. Todas as ferramentas de corte estão sujeitas ao desgaste, que podem se localizar tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga.

Um dos principais tipos de desgaste encontrado nas ferramentas de corte é o desgaste de flanco. De acordo com Sihvo e Varis [75], o desgaste de flanco está presente em todas as operações de corte. É o tipo de desgaste de ferramentas que é

mais conhecido e também é relativamente fácil de ser medido. Para vários tipos de ferramentas, a largura do desgaste de flanco é adequada para predeterminar a vida da ferramenta.

Segundo Amorim [41], o desgaste de flanco ocorre nas superfícies de folga, apresentado na Figura 12, atingindo tanto a aresta principal de corte como a secundária, ou ambas.

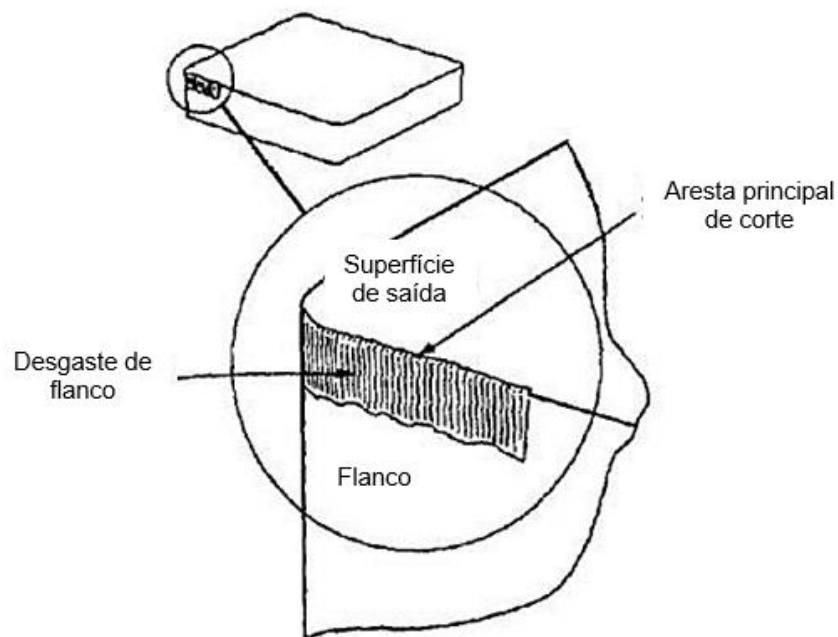


Figura 12 - Representação esquemática do desgaste de flanco  
Fonte: Amorim [41]

Em condições normais de usinagem, o desgaste de flanco é o tipo de falha que apresenta o maior risco de danos à peça e que exige mais potência de corte, motivo pelo qual costuma ser o mais usado na determinação de critérios de fim de vida de ferramenta.

Um segundo tipo de desgaste muito presente nas ferramentas é o desgaste de cratera apresentado na Figura 13. O mesmo ocorre na superfície de saída da ferramenta, onde se localiza, durante o corte, a zona de deslizamento do cavaco.

Segundo Amorim [41], este tipo de desgaste resulta de uma combinação entre os mecanismos de desgaste por abrasão e por difusão, e ocorre principalmente a altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas geradas, o que favorece o mecanismo de desgaste por difusão. Devido à redução da resistência a abrasão



causada pela difusão, é favorecido o desgaste abrasivo, sendo então a forma da cratera resultante da distribuição de tensões na superfície de saída da ferramenta.

O desgaste assume então a forma de uma cratera alongada com as extremidades arredondadas, paralela à aresta de corte.

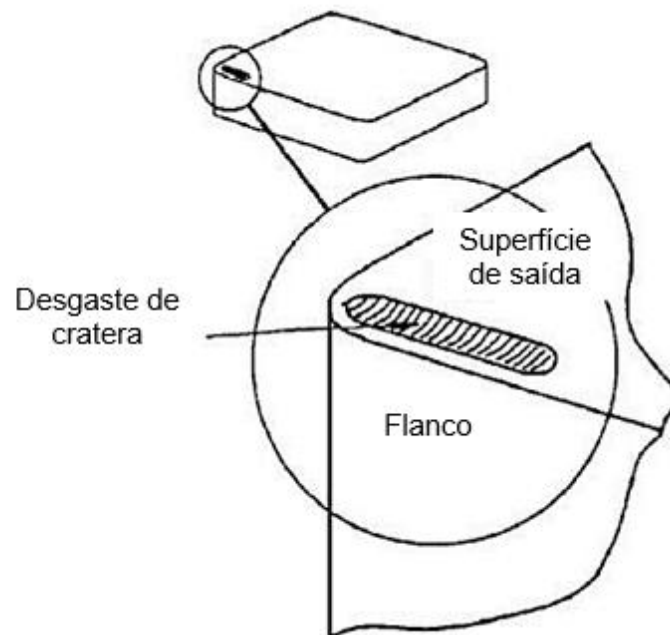


Figura 13 - Representação esquemática do desgaste de cratera  
Fonte: Amorim [41]

Este tipo de desgaste de cratera só ocorre na superfície de saída e é causado pelo atrito do cavaco com a ferramenta. Quando este tipo de desgaste se encontra com o desgaste frontal, ocorre a quebra da ferramenta [26].

Outro desgaste que se apresenta frequente nas ferramentas de corte é o desgaste de entalhe, muitas vezes confundido com o desgaste de flanco.

É comum o desgaste de flanco ser mais pronunciado na região onde ocorre o contato com a superfície externa da peça do que nas demais regiões, o que pode ocorrer devido a várias causas, como corte de uma camada de material endurecido pelo passe anterior da ferramenta ou ainda oxidado devido às altas temperaturas, exposição ao ar ou ao fluido de corte. Este tipo de desgaste é chamado desgaste de entalhe e pode ser representado na Figura 14.

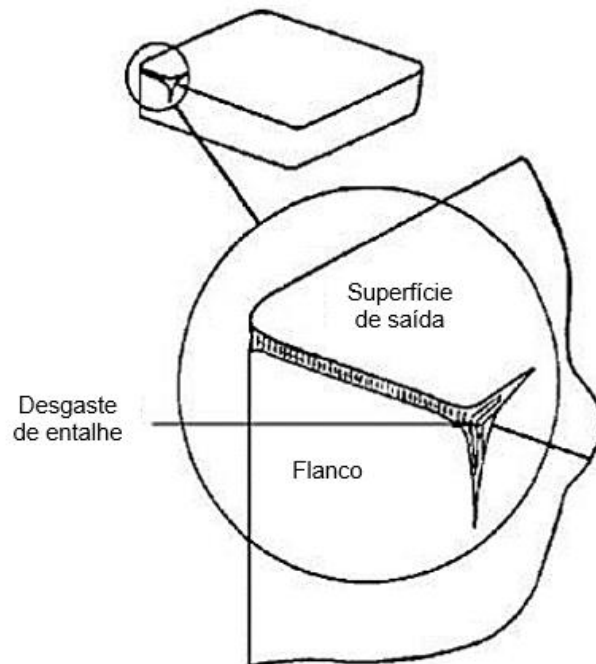


Figura 14 - Representação esquemática do desgaste de entalhe  
Fonte: Amorim [41]

Apesar de nem sempre afetar o processo de corte, o desgaste de entalhe pode ser bastante prejudicial, pois o entalhe costuma ser relativamente profundo, constituindo uma região de concentração de tensões, que pode levar à quebra da ferramenta [41].

O fenômeno de deformação plástica da aresta de corte também se trata de um tipo de desgaste. Ele é um tipo de avaria que ocorre devido à sobreposição dos efeitos da pressão aplicada à ponta da ferramenta e às altas temperaturas nessa região. O crescimento desta, além de piorar o acabamento da superfície, pode gerar a quebra da aresta de corte. Pode ser evitada pela escolha adequada da geometria da ferramenta [26].

Outro tipo de desgaste que pode ser encontrado é o de lascamento. Ocorre em materiais frágeis. Diferentemente dos desgastes frontal e de cratera que retiram pequenas partículas continuamente, este tipo de desgaste retira partículas maiores de uma só vez da ferramenta de corte. Pode ser eliminado pelo uso adequado do ângulo de incidência. O lascamento ou a quebra são o resultado de uma sobrecarga das tensões de tração mecânica. Estas tensões podem ocorrer por vários motivos, como martelamento de cavacos, uma profundidade de corte ou avanço muito alto, inclusão de areia no material da peça, aresta postiça, vibrações ou desgaste excessivo na pastilha [33].

Por fim, pode-se citar as trincas como sendo também um tipo de avaria encontrado nas ferramentas de corte. Este tipo de avaria é causado pela variação de temperatura que ocasiona fadiga térmica e/ou esforços mecânicos. Quando tem origem térmica, ocorrem perpendicularmente à aresta de corte. Quando tem origem mecânica, devido, por exemplo, ao corte interrompido, são paralelas à aresta [26].

#### **2.4.5 Critérios de fim de vida de ferramenta de corte segundo norma ISO 3685**

Devido ao caráter progressivo do desgaste de ferramentas de corte, é necessário, para evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos por operação inadequada da máquina operatriz, que se defina até onde uma ferramenta de corte pode ser útil, e quando esta começa a perder suas características operacionais, ou seja, quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída [41].

Em situações práticas, o tempo em que uma ferramenta de corte perde sua capacidade de produzir peças com dimensões e qualidade da superfície desejadas, determina o fim de vida da ferramenta. Não obstante, os critérios adotados para determinar o fim de vida da ferramenta podem ser diferentes em cada caso, dependendo das condições de corte, etc [42].

A norma ISO 3685 [42] sugere um padrão para o teste de vida da ferramenta. Neste padrão o tempo de vida da ferramenta é determinado pelo máximo desgaste permitido. Segundo a norma, os critérios que devem ser adotados para ferramentas de metal duro são (Fig. 15):

- Desgaste de flanco médio,  $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ ;
- Desgaste de flanco máximo,  $VB_{B \text{ Máx}} = 0,6 \text{ mm}$ , no caso de o desgaste não ocorrer de forma regular ao longo do flanco;
- Profundidade da cratera,  $K_T = 0,06 + 0,3 \cdot f$ , (onde  $f$  representa o avanço);
- Falha catastrófica.

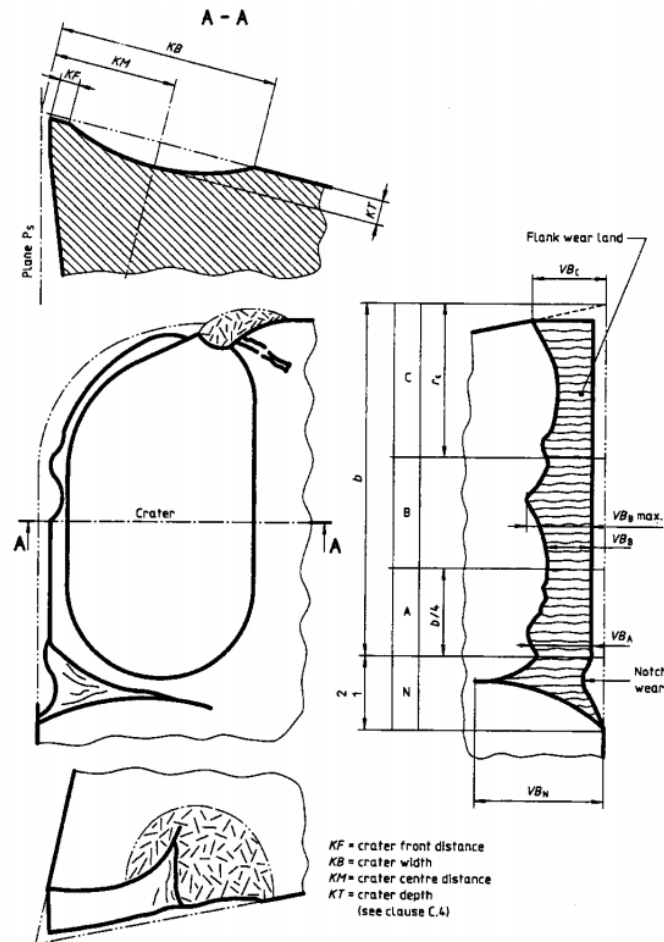


Figura 15 - Critérios de desgaste de ferramenta de corte  
 Fonte: Adaptado de ISO 3685 [42]

É recomendado pela norma ISO 3685 [42] a reafiação ou substituição da ferramenta ao atingir qualquer um destes limites.

De acordo com Dieter [70], a vida da ferramenta pode ser calculada baseada na degradação do acabamento da superfície, até atingir um valor admissível, ou quando o incremento das forças de corte ultrapassa um valor, ou quando a amplitude da vibração atinge um valor limite.

## 2.5 ACABAMENTO DA SUPERFÍCIE

Geralmente especificado em projetos mecânicos, o acabamento da superfície, representado principalmente pela rugosidade, consiste em um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, que tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície. Estas irregularidades estão presentes em todas as superfícies reais, por mais perfeitas que estas sejam, e muitas

vezes constituem uma herança do método empregado na obtenção da superfície (torneamento, fresamento, etc) [26].

As operações de corte de metal são generalizadas na indústria de transformação e a previsão e / ou o controle de parâmetros de usinabilidade sempre atraem interesse. Um parâmetro básico de usinabilidade é a textura da superfície, pois está intimamente associada à qualidade, confiabilidade e desempenho funcional dos componentes [76].

Parâmetros de rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento da superfície de um componente. Dentre todos, os mais amplamente usados são a rugosidade máxima ( $R_t$ ) e a rugosidade média ( $R_a$ ). A rugosidade máxima ( $R_t$ ) é definida como a maior média encontrada nos comprimentos de amostragem. A rugosidade média ( $R_a$ ) consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento em relação à linha média. Pode ser representada como a altura de um retângulo com área igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média, e comprimento igual ao percurso de medição conforme apresentado na Figura 16 [26].

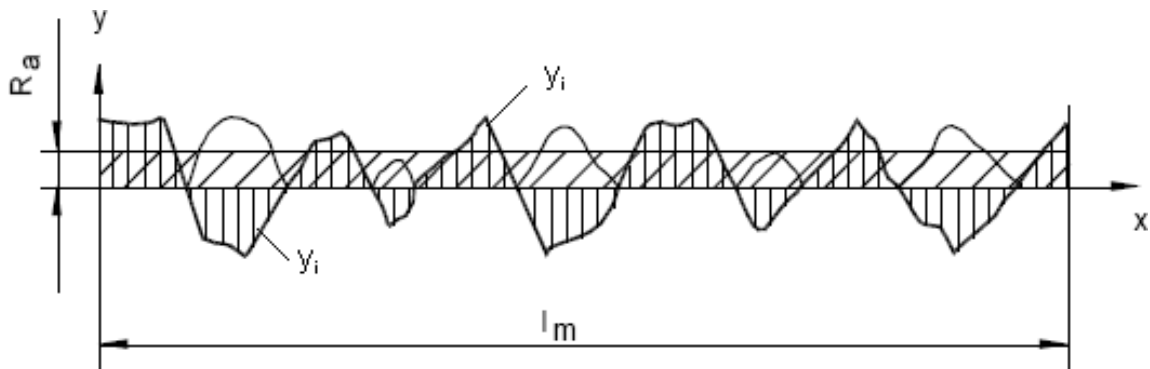


Figura 16 - Representação do cálculo de medição para Rugosidade média  $R_a$   
Fonte: Tedesco [77]

Na prática industrial comum, a rugosidade da superfície é avaliada principalmente pelos parâmetros de rugosidade  $R_a$  (média) e  $R_t$  (máxima). No entanto, deve-se notar que os parâmetros acima mencionados, por si só, não fornecem informações sobre a forma do perfil. Características como inclinação e curvatura das asperezas da superfície, vazio ou plenitude do perfil, a distribuição do material do perfil em várias alturas é registrada na forma do perfil. Os aspectos tribológicos essenciais

(por exemplo, atrito, desgaste, estado de lubrificação) são altamente dependentes da forma do perfil.

A rugosidade ou textura primária é formada por sulcos ou marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça e se encontra superposta ao perfil de ondulação. A ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades repetidas em onda de comprimento bem maior que sua amplitude, ocasionadas por imprecisões de movimentos dos equipamentos. A textura da superfície é medida por meio de diversos tipos de aparelhos (ópticos laser, eletromecânicas), sendo os mais utilizados os aparelhos eletromecânicos. O aparelho usado para medir a rugosidade é chamado rugosímetro [78].

De acordo com Vaxevanidis et al. [67], as rugosidades da superfície são essenciais para determinar o desempenho dos processos de usinagem e expandir a vida da ferramenta. A interação dos parâmetros de corte pode estar diretamente relacionada ao desgaste da ferramenta e, nos piores casos, à falha da ferramenta.

Segundo Javidi et al. [79], um grande valor de avanço no corte permite minimizar o tempo de corte, mas provoca aumento substancial no valor da rugosidade. Um grande raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) de ferramenta melhora o acabamento da superfície, mas provoca o aumento da vibração no momento da usinagem, dificulta a quebra dos cavacos gerados e diminui a vida da ferramenta.

O aumento do raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) torna a quina da ferramenta mais resistente, mas também aumenta a vibração da ferramenta devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça. O acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço e raio de ponta ( $r_\epsilon$ ). Este par ( $f$ - $r_\epsilon$ ) tem uma contribuição geométrica à rugosidade da superfície apresentada na Fig. 17, sendo o cálculo da rugosidade máxima teórica da superfície dada pela Eq. (3) [32].

$$R_{m\acute{a}x\ teo} = \frac{f n^2}{8 \times r_\epsilon} \quad (3)$$

Onde:

$R_{m\acute{a}x\ teo}$  = Rugosidade máxima teórica ( $\mu\text{m}$ )

$f_n$  = Avanço (mm/rot);

$r_\epsilon$  = Raio de ponta da ferramenta (mm);

Ou ainda, para a rugosidade média teórica ( $R_a$ ) através da Eq. (4):

$$R_a = \frac{fn^2}{31,2 \times r_\epsilon} \quad (4)$$

Onde:

$R_a$  = Rugosidade média teórica ( $\mu\text{m}$ )

$f_n$  = Avanço (mm/rot);

$r_\epsilon$  = Raio de ponta da ferramenta (mm);

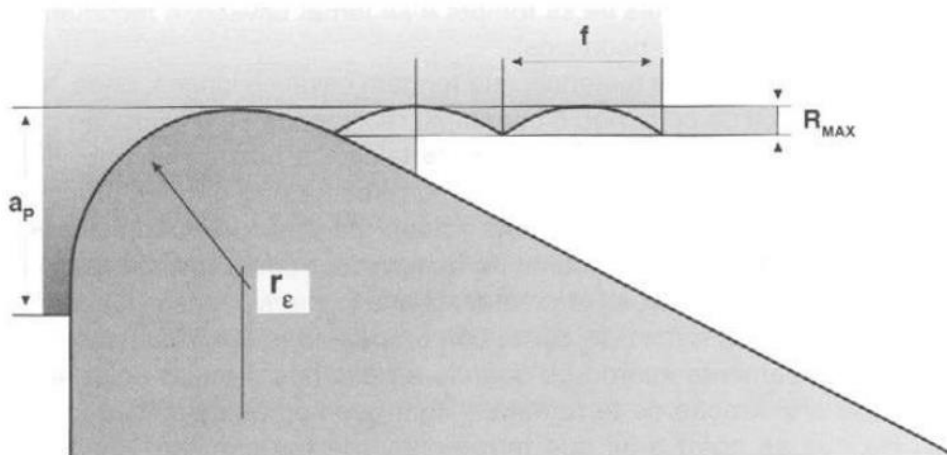


Figura 17 - Contribuição geométrica do avanço e raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) de ferramenta na rugosidade  
Fonte: Javidi et al [70]

Nota-se que a rugosidade é influenciada principalmente pela relação entre avanço da ferramenta e raio de ponta ( $r_\epsilon$ ). No entanto, a rugosidade real obtida é maior do que a estimada pelas Eq. (3) e (4), devido a fatores como vibração, deformação do cavaco e fluxo lateral do cavaco [33].

De acordo com Machado e Silva [26], a importância do acabamento da superfície justifica-se pela sua relação, entre outros, com fatores como:

- Precisão e tolerância – Muito importante, em especial em peças com acoplamentos onde furo e eixo estejam em movimento relativo. Neste caso,

superfícies com rugosidades mais pronunciadas estarão expostas a desgastes mais intensos do que os que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento;

- Resistência à corrosão – Superfícies com acabamentos superficiais mais pobres tendem a reter maior quantidade de líquidos e vapores do que superfícies melhor acabadas. Desse modo, tornam-se mais vulneráveis à corrosão;
- Resistência à fadiga – Peças que trabalham sob cargas dinâmicas necessitam de melhor acabamento da superfície, pois superfícies com alta rugosidade apresentam maior área efetiva, e geometrias mais propensas a concentração de tensões, oferecendo melhores condições para a nucleação de trincas de fadiga;
- Escoamento de fluidos – Superfícies com melhores acabamentos permitem escoamentos laminares a faixas mais amplas de velocidade, reduzindo a turbulência. No caso de pistões ou elementos que atuem como retentor, superfícies com melhor acabamento garantem uma vedação mais eficiente, evitando a fuga do elemento sob pressão.
- Lubrificação – Caso a profundidade da rugosidade de um entre dois componentes entre os quais haja lubrificação seja maior do que a espessura do filme de óleo usado, ocorrerá contato entre partes metálicas, anulando a lubrificação.



### **3 METODOLOGIA**

As pesquisas experimentais são utilizadas para testar hipóteses que estabelecem relações de causa e efeito entre as variáveis. É valiosa por viabilizar várias alternativas de monitoramento. Este capítulo visa descrever a metodologia experimental utilizada bem como os recursos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. A seguir será apresentada a descrição detalhada da metodologia empregada para alcançar o objetivo proposto.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL EM ESTUDO**

Nesta etapa serão apresentados os materiais e procedimentos utilizados para o estudo de usinabilidade no torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3, detalhando as principais etapas do processo experimental.

##### **3.1.1 Geometria dos corpos de prova**

Buscou-se para a realização deste estudo a utilização de corpos de prova com geometria similares as de um determinado modelo de peça muito fabricado por uma empresa metalúrgica localizada no Sul de Santa Catarina. Este modelo de peça foi escolhido como base devido ao seu consumo solicitado pela indústria química.

A região de interesse dos corpos de prova é praticamente constituída de um diâmetro externo bruto com 68 mm e comprimento de 120 mm, local este onde os ensaios de usinabilidade seriam aplicados. A Figura 18 apresenta as dimensões principais do corpo de prova.

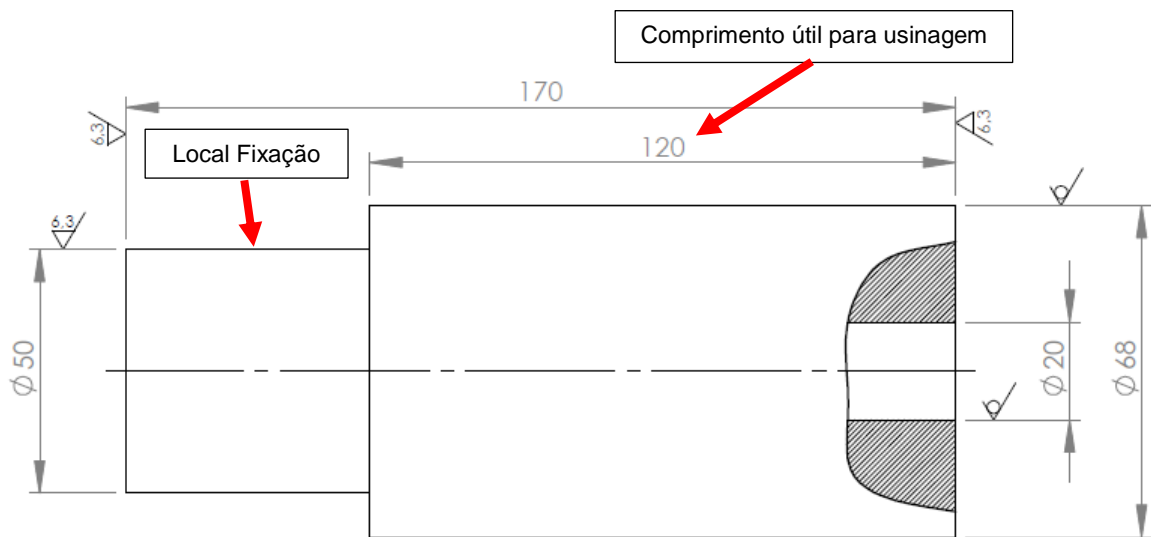


Figura 18 - Dimensões do corpo de prova preparado para os ensaios de usinabilidade (todas as medidas em mm)  
 Fonte: Autoria própria

Já no laboratório de usinagem, os corpos de prova foram submetidos a uma etapa de preparação antes dos ensaios principais. Nesta etapa, o corpo de prova bruto é preparado para realizar a fixação do mesmo em torno CNC, sendo este processo realizado em torno convencional e não fazendo parte do escopo deste estudo. O local de fixação e o comprimento útil de usinagem para realização dos testes também estão apresentados na Figura 18.

### 3.1.2 Composição química

Os corpos de prova foram fabricados através do processo de fundição por gravidade em moldes de areia devidamente produzidos pelo processo de moldagem fenólico uretânica (PEP-SET). A liga do material foi preparada para permanecer entre os limites máximos e mínimos estipulados pela norma ASTM A518 GR.3 [11]. A composição química solicitada pela norma esta apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% em peso) conforme norma ASTM A518 GR.3

ELEMENTO	ASTM A518 GR.3	
	% MÍN	% MÁX
<b>C</b>	0,70	1,10
<b>Mn</b>	-	1,50
<b>Si</b>	14,20	14,75
<b>Cu</b>	-	0,50
<b>Cr</b>	3,25	5,00
<b>Mo</b>	-	0,20

Fonte: ASTM [11]

Após a fundição dos corpos de prova, os mesmos foram desmoldados e submetidos a etapa de tratamento térmico de recozimento proveniente do processo de fabricação desta liga. Na sequência, foram retiradas dos corpos de prova amostras para a realização de ensaios de análise química, afim de identificar a composição química resultante apresentada pelos mesmos.

### 3.1.3 Determinação da dureza

Com a etapa de tratamento térmico já concluída e sua composição química já verificada e confirmada, os corpos de prova foram submetidos ao processo de acabamento e remoção de rebarbas através de esmerilhadeira. De posse dos corpos de prova já acabados, os mesmos foram encaminhados ao controle de qualidade de material fundido, onde nesta etapa foram realizados os ensaios de medição de dureza pelo método Brinell. Após o ensaio de dureza, os mesmos foram liberados para a etapa de usinagem, sendo este o processo de fabricação de interesse para este estudo.

## 3.2 EQUIPAMENTOS

Neste subcapítulo serão apresentados os principais equipamentos utilizados no procedimento experimental do estudo de usinabilidade no torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3.

### 3.2.1 Máquina-ferramenta

Com as regiões de fixação devidamente preparada através de usinagem convencional, os corpos de prova foram encaminhados ao Laboratório de Usinagem CNC da UNISATC localizada em Criciúma / SC, onde os ensaios de usinabilidade foram realizados. O equipamento utilizado para usinagem dos corpos de prova foi um torno CNC modelo CENTUR 30S do fabricante ROMI® com comando numérico modelo Mach 9, conforme Figura 19.



Figura 19 - Equipamento torno CNC modelo CENTUR 30S, fabricante ROMI®  
Fonte: Autoria própria

O objetivo de realizar os ensaios de usinagem deste estudo em um torno CNC vai de encontro com o objetivo de um melhor controle dos parâmetros de entrada do processo e a padronização dos mesmos durante os ensaios.

### 3.2.2 Lupa digital

Os recursos utilizados para esta avaliação do desgaste do inserto foram: 01 (um) microscópio digital USB com aumento de até 1000x, devidamente calibrado através de seu software com uma precisão de medição de 0,01 mm e 01 (um) notebook no qual o microscópio digital estava conectado e executando o software CoolingTech® para captura das imagens da lupa. A Figura 20 demonstra o conjunto dos equipamentos e a imagem gerada no software utilizado para a avaliação e medição do desgaste do inserto.

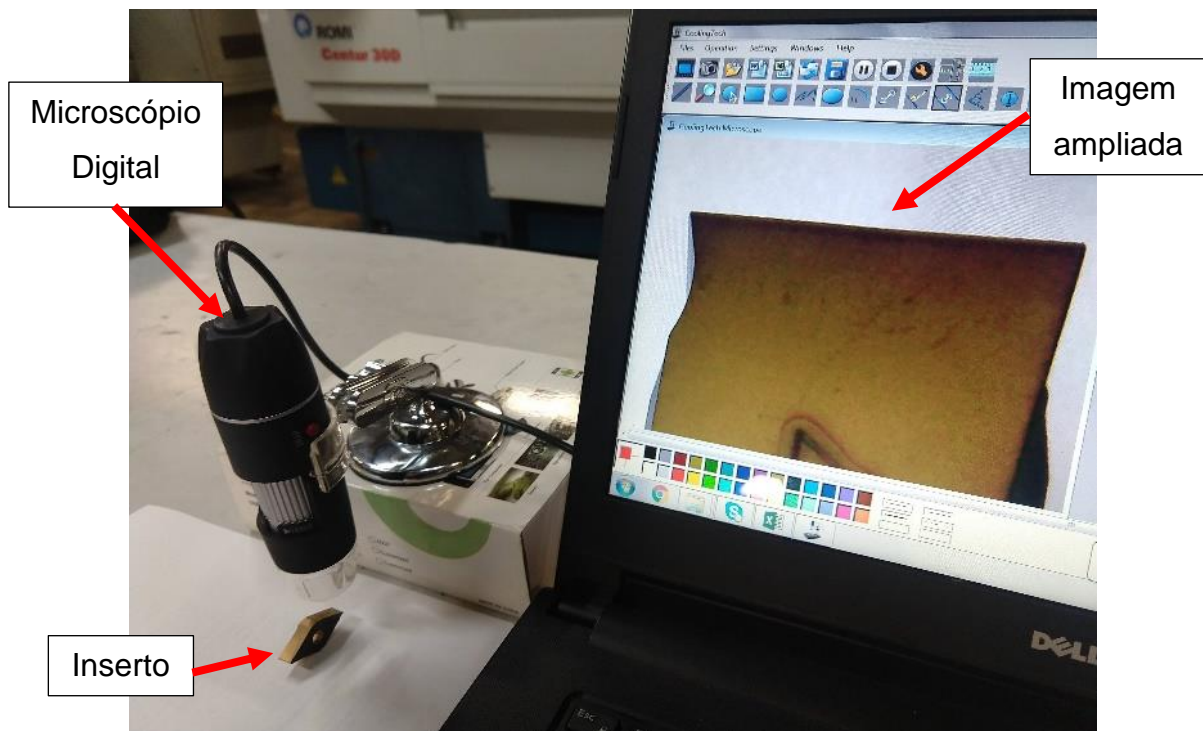


Figura 20 - Conjunto de recursos utilizados para avaliação do desgaste do inserto (Microscópio digital USB, aumento de até 1000x)

Fonte: Autoria própria

A bancada de análise foi montada no próprio laboratório de usinagem, ao lado do equipamento Torno CNC, afim de facilitar o processo durante as avaliações de desgaste dos insertos.

### 3.2.3 Rugosímetro portátil

O acabamento da superfície dos corpos de prova durante os ensaios de usinabilidade foi avaliado com a utilização de um equipamento rugosímetro modelo SJ-310 do fabricante MITUTOYO®, apresentado na Figura 21.



Figura 21 - Rugosímetro Portátil Surftest SJ-310, Fabricante MITUTOYO®  
Fonte: Autoria própria

Por sua vez, a cada início de ciclo de utilização o mesmo foi calibrado de acordo com procedimento do próprio fabricante do equipamento.

## 3.3 FERRAMENTAS

Nesta seção serão apresentados os ensaios preliminares realizados para determinação dos principais insertos a serem utilizados na realização do estudo de usinabilidade da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3, bem como geometria e dimensional dos insertos escolhidos e seus parâmetros de corte indicados por seus fabricantes.

### 3.3.1 Ensaios preliminares

Foram realizados ensaios preliminares para definir quais insertos seriam utilizados no estudo de usinagem. Inicialmente foram selecionados 03 fornecedores

de ferramentas de usinagem que apresentaram as melhores opções disponíveis em sua gama de produtos para a usinagem desta liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3. Cada fornecedor indicou 02 opções de insertos, com características de geometrias, coberturas e tecnologias de usinagem distintas.

Os 06 insertos foram submetidos a testes preliminares de torneamento externo em corpos de prova apresentados na Figura 18, com parâmetros de corte inicialmente indicadas por seus fornecedores. Para cada ensaio de cada inserto, avaliações perante o desgaste da aresta de corte, lascamento da peça, temperatura resultante do corpo de prova e acabamento da superfície foram realizados.

Para cada ensaio, caso o inserto apresenta-se boas condições de usinabilidade baseado nos critérios acima mencionados, os seus parâmetros de corte eram aumentados a uma taxa de 10%, assim sucessivamente os ensaios foram realizados até que um dos critérios de avaliação definiria o fim do ensaio para aquele determinado inserto, estipulando o limite de seus parâmetros de corte para a liga e o processo em estudo. Na Tabela 4 estão apresentados os valores de velocidade de corte ( $v_c$ ) e Taxa de remoção (Q) máximos obtidos durante os ensaios preliminares para os 06 insertos testados.

Tabela 4 - Informações e parâmetros de corte máximos obtidos nos testes preliminares

<b>Forn.</b>	<b>Inserto</b>	<b>Raio de ponta (<math>r_s</math>) (mm)</b>	<b>Geometria</b>	<b><math>v_c</math> (m/min)</b>	<b>Q (cm<sup>3</sup>/min)</b>
C	WNMG080408MFBA0731	0,8	W	73,5	8,3
B	DNMG150604-RK4315	0,4	D	53,0	6,8
C	WNMG080408.66TIX 40	0,8	W	50,7	5,7
B	TPUN160304-H13A	0,4	T	40,8	6,1
A	WNMA 080416	1,6	W	31,7	5,1
A	WNMA 080408	0,8	W	31,1	5,0

Fonte: Autoria própria

Visto que o material em estudo não se trata de um ferro fundido cinzento comum (classe K), mas sim de um ferro fundido com alto percentual (em peso) de silício e com base em alguns parâmetros levantados nos ensaios preliminares realizados, pode-se identificar alguns valores limitantes para os parâmetros de corte a serem aplicados neste estudo, sendo o principal deles a profundidade de corte ( $a_p$ ).

### 3.3.2 Ferramentas selecionadas para o estudo de usinagem

Com base nos resultados apresentados na Tabela 04, foram selecionados os 02 insertos que apresentaram os maiores valores de velocidade de corte ( $v_c$ ) e Taxa de remoção (Q) de material para serem aplicados neste estudo.

O primeiro inserto escolhido foi o WNMG 080408 MF BA0731 (fabricante BFT BURZONI®). As informações técnicas do inserto estão melhor apresentadas na Figura 22.

PARÂMETRO	VALOR
Formato da Pastilha	W
RE	0,8 mm
S	4,76 mm
LE	7,89 mm
Sentido de corte	Neutro
Ângulo de folga	0 deg
Cobertura	PVD (TiAlN+TiN)
Vida de corte estimada pelo fabricante	15 min
$a_p$	2,0 mm (0,7 – 4,0)
$f_n$	0,35 mm/rot (0,25 – 0,50)
$v_c$	180 m/min (70 – 220)

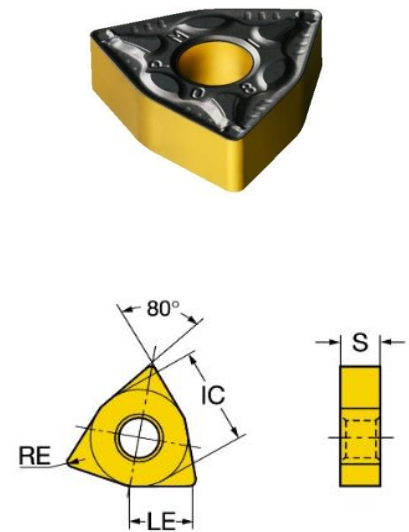


Figura 22 - Parâmetros de corte e informações de geometria para o inserto WNMG 080408 MF BA0731 – Classe de material K  
Fonte: Burzoni [80]



Já o segundo inserto escolhido foi o DNMG 150604 RK4315 (fabricante SANDVIK®). As informações técnicas do inserto estão melhor apresentadas na Figura 23.

PARÂMETRO	VALOR
Formato da Pastilha	D
RE	0,4 mm
S	6,35 mm
LE	15,1 mm
Sentido de corte	Direito
Ângulo de folga	0 deg
Cobertura	CVD Ti(C,N)+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiN
Vida de corte estimada pelo fabricante	15 min
$a_p$	2,5 mm (0,7 – 5)
$f_n$	0,22 mm/rot (0,14 - 0,3)
$v_c$	260 m/min (245 – 280)

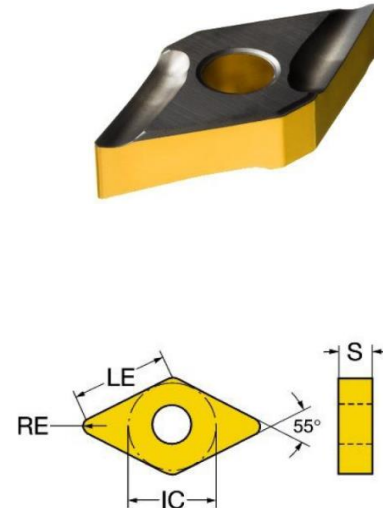


Figura 23 - Parâmetros de corte e informações de geometria para o inserto DNMG 150604 RK4315 – Classe de material K  
Fonte: Sandvik [81]

Os dois insertos apresentados, definidos nos ensaios preliminares, foram então submetidos a um estudo mais aprofundado, buscando encontrar os melhores resultados para a usinagem de torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3.

### 3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa utilizando ensaios de usinabilidade não envolve somente os fabricantes de materiais, mas também os consumidores e os fabricantes de ferramenta de corte. Apresenta, além disso, uma enorme relevância para a produção de uma dada empresa, razão pela qual existe interesse em se estabelecer métodos de ensaio que permitam estudar a usinabilidade de um material [40].

Um ensaio ou teste de laboratório é um procedimento previamente estabelecido em que variações propositais são feitas nos níveis dos fatores de controle para observar, identificar e inferir sobre as influências e seus pesos na variável de resposta que se pretende estudar. Assim, fatores de controle ou variáveis de entrada são previamente escolhidos para que, em um dado processo ou teste, uma análise do efeito das variações de seus níveis na resposta procurada seja realizada [40].

Dentre as variáveis envolvidas no processo de corte com formação de cavaco, existem aquelas nas quais se pode intervir (variáveis independentes de entrada) e aquelas nas quais não se pode (variáveis dependentes de saída), já que sofrem influência da mudança nas variáveis de entrada [82].

De acordo com Souza [8], uma maneira de controlar o processo de usinagem é atuar diretamente nas variáveis de entrada (independentes) e mensurar seu efeito através da medida de variáveis dependentes de saída.

As condições ideais para um determinado processo de usinagem podem ser determinadas com um melhor aproveitamento da ferramenta de corte e uma melhor taxa de remoção de material. A Figura 24 resume todas as relações entrada/saída associadas com o processo de torneamento.

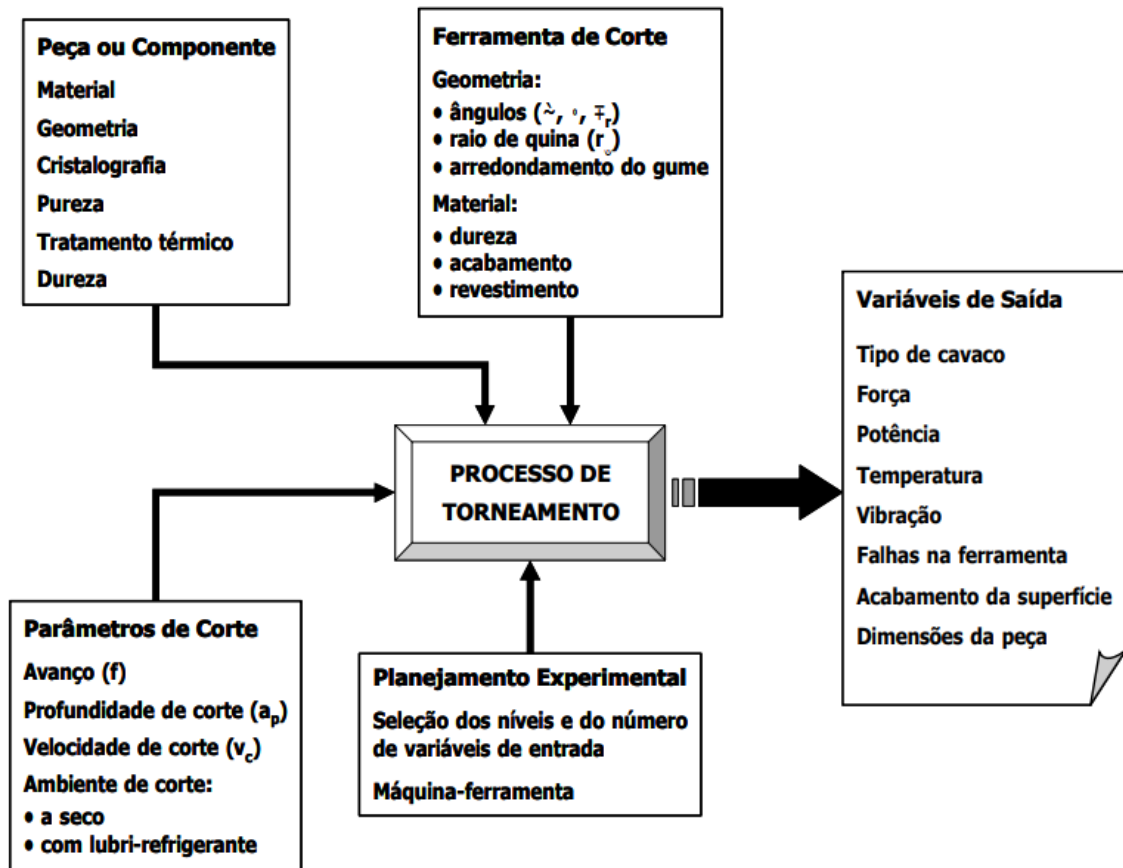


Figura 24 - Relações de entrada e saída em torneamento  
 Fonte: Black [82]

Para este estudo, foram definidas como variáveis de entrada independentes a geometria da ferramenta de corte e os parâmetros de corte Velocidade de corte ( $v_c$ ), medida em m/min e o avanço de corte ( $f_n$ ), medido em mm/rot e aplicados no processo de usinagem por torneamento.

### 3.4.1 Definição das variáveis de entrada

Como citado anteriormente, durante os ensaios preliminares foram identificados alguns limitantes para os parâmetros de corte aplicados durante estes ensaios, sendo um destes limitantes o parâmetro de profundidade de corte ( $a_p$ ). Em todos os insertos avaliados, a máxima profundidade de corte aplicada sem que ocorressem problemas da peça a ser usinada ou na própria ferramenta foi de 0,5 mm. Para valores acima deste, apresentava-se a ocorrência de lascamento na região de corte do corpo de prova. Sendo assim, o valor de 0,5mm foi determinado como limite máximo de nossa profundidade de corte ( $a_p$ ) para este estudo.

Quanto ao avanço de corte ( $f_n$ ), para valores acima de 0,25 mm/rot todos os 6 insertos testados apresentaram problemas de lascamento da região de usinagem, desgaste praticamente que instantâneo e/ou colapso do inserto de corte nos primeiros segundos de usinagem. Com esta limitação, não se pode neste momento optar por avanços maiores de 0,2 mm/rot.

Já para a velocidade de corte ( $v_c$ ), valores muito abaixo do estabelecido inicialmente pelos fornecedores foram utilizados. Durante os testes preliminares, as velocidades de corte dos 6 insertos testados apresentaram-se todos sempre abaixo de 80 m/min como pode ser visto na Tabela 4.

Para os 02 insertos escolhidos não foi diferente, porém foram os que se destacaram entre os 06 insertos nos ensaios preliminares quanto a velocidade de corte e taxa de remoção de material. Desta forma, a velocidade de corte de 50 m/min foi determinada como o valor intermediário a ser utilizado nos ensaios de usinabilidade. Com estas limitações e com base nos ensaios preliminares, pode-se então definir os parâmetros de corte intermediários para serem aplicados aos testes de usinabilidade para os dois insertos de corte escolhidos, sendo os mesmos apresentados na Tab. 5.

Tabela 5 - Variáveis de entrada para os ensaios de usinabilidade

<b>Variáveis Entrada</b>	<b>Valores aplicados</b>		
<b><math>v_c</math> (m/min)</b>	40,0	50,0	73,5
<b><math>f_n</math> (mm/rot)</b>	0,15		0,20
<b><math>a_p</math> (mm)</b>	0,5		

Fonte: Autoria própria

Foram definidas como variáveis de entrada os parâmetros de velocidade de corte ( $v_c$ ) e de avanço ( $f_n$ ), tomando como fixa a profundidade de corte ( $a_p$ ) aplicada a todos os ensaios. Para a velocidade de corte foram estipulados três níveis de aplicação, o intermediário, um acima e outra abaixo deste valor intermediário. Já para o avanço de corte foram estipulados dois níveis de trabalho e a profundidade de corte ( $a_p$ ) ficou fixada em 0,5 mm. A Tabela 6 apresenta as configurações planejadas para os ensaios de usinabilidade deste estudo.

Tabela 6 - Planejamento das configurações dos parâmetros de usinagem para os ensaios de usinabilidade.

<b>Código da Configuração</b>	<b><math>v_c</math> (m/min)</b>	<b><math>f_n</math> (mm/rot)</b>
$v_c$ 40fn15	40,0	0,15
$v_c$ 40fn20	40,0	0,20
$v_c$ 50fn15	50,0	0,15
$v_c$ 50fn20	50,0	0,20
$v_c$ 73fn15	73,5	0,15
$v_c$ 73fn20	73,5	0,20

Fonte: Autoria própria.

Desde modo, o planejamento dos ensaios pode ser elaborado. Um total de 6 configurações por inserto foram planejadas, sendo considerada uma réplica para cada uma das configurações. Com base nestes parâmetros determinados, para cada configuração pode-se calcular a Taxa de remoção de material (Q) dada em  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

### 3.4.2 Variáveis de resposta

Determinadas as variáveis de entrada, buscou-se então estipular quais as variáveis de saída que seriam mensuradas durante a realização dos ensaios. Dentre as diversas possibilidade de respostas para avaliação de um ensaio de usinagem, o tempo de vida da ferramenta de corte (T) em minutos e a rugosidade da superfície do corpo de prova ( $R_a$ ) em micrometros foram os escolhidos para representarem os resultados principais destes ensaios, visando claro, obter melhores tempos de usinagem, uma maior vida da ferramenta e uma faixa de rugosidade que venha atender a especificação dos produtos fabricados por torneamento externo para esta liga em questão.

Além destes resultados, também foi avaliado neste estudo para melhor compreensão dos resultados o comprimento de corte total ( $L_c$ ), fornecida em milímetros para cada inserto em seus determinados parâmetros de corte.

### 3.4.3 Planejamento dos ensaios

Quando um determinado conjunto de parâmetros é aplicado a um objeto de estudo pode-se determinar uma resposta inicial para o ensaio. Quando se altera o nível dos parâmetros, a resposta inicial pode sofrer uma alteração. Essas mudanças denominam-se tratamentos [83].

Um planejamento fatorial é completo quando todas as possíveis combinações entre os fatores envolvidos são experimentadas [83].

As variáveis de influência possuem dois níveis para a geometria das ferramentas de corte, dois níveis para avanço de corte, três níveis para as velocidades de corte e duas réplicas, as mesmas estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de controle e os níveis adotados no planejamento experimental

Variáveis de entrada	Níveis		
	-1	0	+1
<b>Geometria da Ferramenta</b>	WMNG	-	DNMG
<b><math>v_c</math> (m/min)</b>	40,0	50,0	73,5
<b><math>f_n</math> (mm/rot)</b>	0,15	-	0,20

Fonte: Autoria própria

O controle dos níveis dos fatores pôde ser plenamente satisfeito, uma vez que o raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) do inserto, a geometria do quebra-cavaco e o tipo de revestimento são fornecidos e garantidos pelo fabricante da ferramenta. A profundidade de usinagem ( $a_p$ ), o avanço ( $f_n$ ) e velocidade de corte ( $v_c$ ) também puderam ser implementadas e medidas por meio do controle numérico computadorizado da máquina.

A preocupação em avaliar o erro experimental também mereceu atenção na condução dos ensaios. É por esse motivo que pelo menos uma repetição foi aplicada aos ensaios e os procedimentos de ensaio foram devidamente monitorados para que influências externas fossem minimizadas. Como a média amostral é usada para

estimar o efeito de um fator no experimento, a repetição permite obter uma estimativa mais precisa desse efeito.

A aleatorização do experimento é algo importante e desejável para garantir que a variação incontrollável seja proveniente apenas da mudança de níveis dos fatores e do erro aleatório. A chance de má interpretação dos resultados é reduzida com esta técnica [84].

### 3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Usinagem CNC da UNISATC situada em Criciúma/SC. Abaixo na Figura 25, pode-se observar melhor todo o procedimento experimental através do fluxograma apresentado.

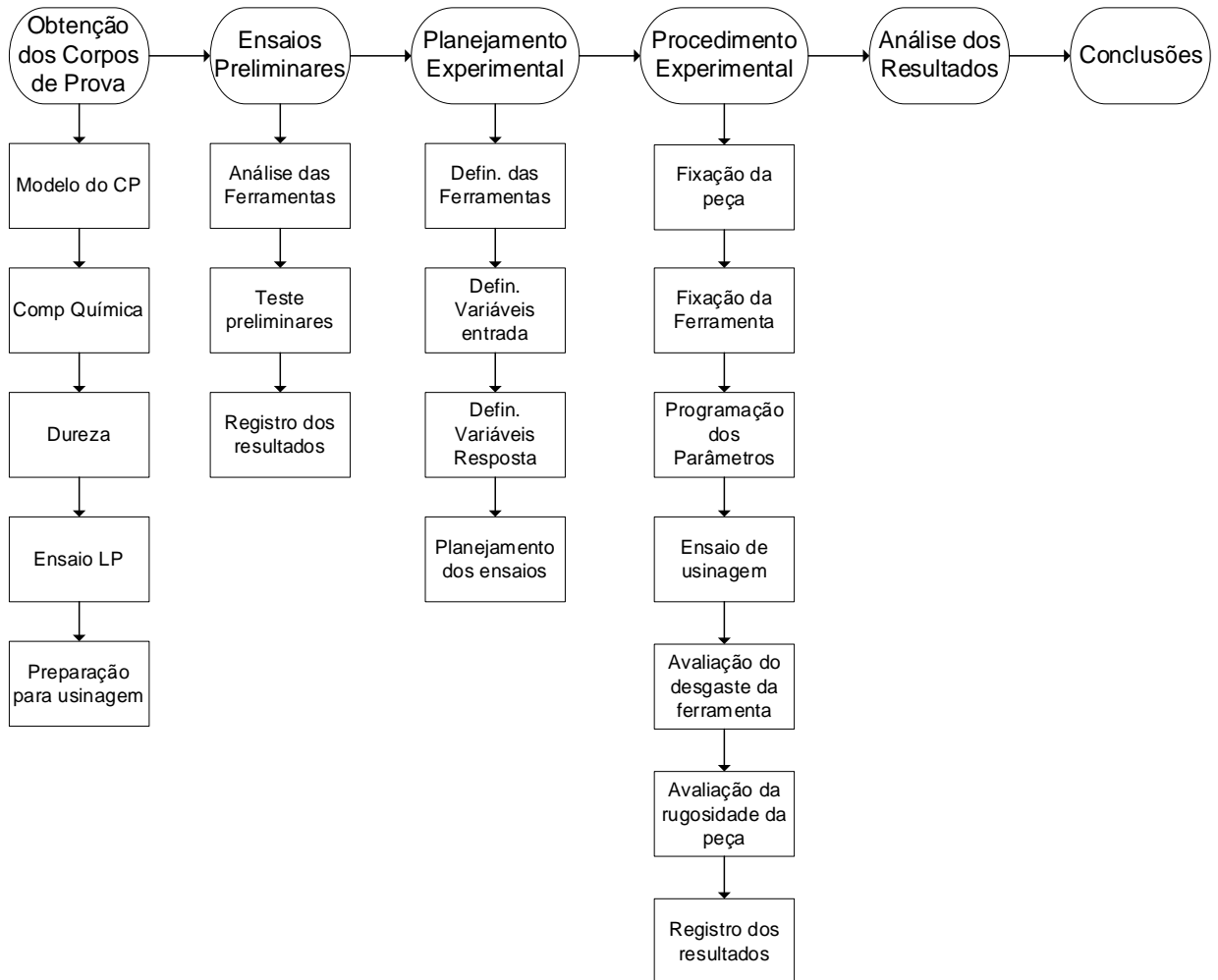


Figura 25 - Fluxograma do procedimento experimental  
Fonte: Autoria própria



O fluxograma apresentado na Figura 25 mostra os passos seguidos para a obtenção dos corpos de prova e os procedimentos adotados para a elaboração e execução dos ensaios, assim como a metodologia de coleta dos resultados.

A metodologia dos ensaios se deu da seguinte forma: para cada um dos dois insertos e para cada uma das seis configurações de usinagem, aplicou-se um passe de usinagem com comprimento conhecido sobre o corpo de prova. A cada passe o inserto de corte foi removido do suporte e levado até a bancada próxima ao torno onde a lupa digital estava instalada. A medição parâmetro de desgaste VB no inserto foi realizada e também a medição do parâmetro de rugosidade ( $R_a$ ) no corpo de prova, que por sua vez foi feita com o posicionamento do rugosímetro sobre a região de usinagem no sentido longitudinal com a peça fixada na placa do torno CNC.

Caso o desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) do inserto estivesse abaixo dos valores estipulados pela norma ISO 3685, o inserto era fixado novamente ao suporte para iniciar um novo passe. Se o desgaste encontrado fosse um valor igual ou acima do estipulado pela norma ISO 3685, considerava-se o término do ensaio. Foi considerada uma réplica para cada configuração do ensaio.

Assim este capítulo apresenta o planejamento experimental e a metodologia utilizada nos ensaios, descrevendo características do material usinado, as especificações das ferramentas de corte, da máquina-ferramenta, do monitoramento do desgaste de flanco e da medição da rugosidade.

### **3.5.1 Fixação da peça (corpo de prova)**

A fixação do corpo de prova no torno se deu por meio de uma placa de 3 castanhas acionada por sistema pneumático, onde a pressão de trabalho utilizada foi de 10 bar. As castanhas são numeradas em ordem crescente no sentido de giro anti-horário (Figura 26), esta numeração serviu de orientação à medição das rugosidades durante os ensaios.

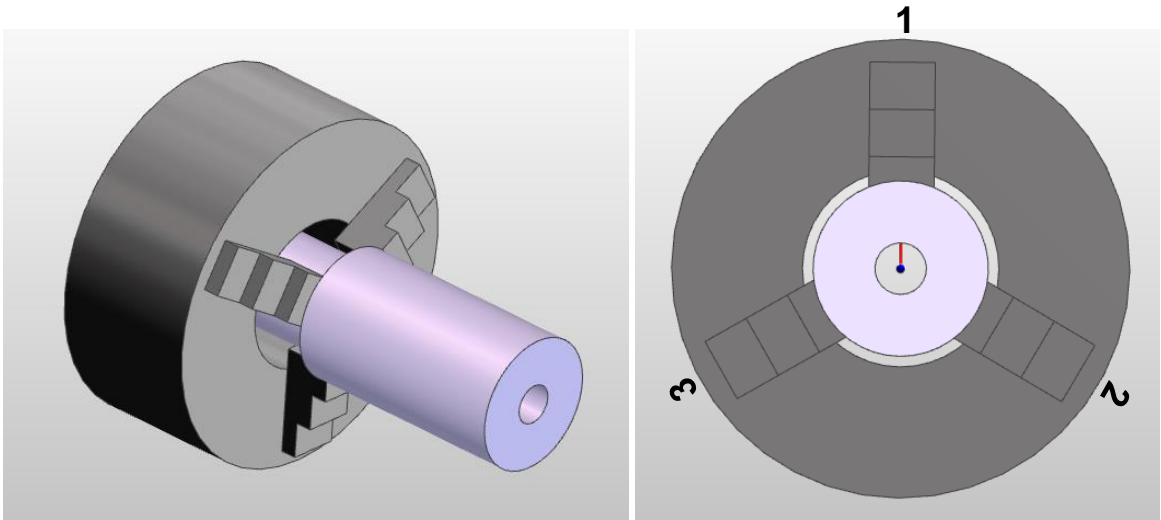


Figura 26 - Representação de fixação da peça na placa de 3 castanhas do torno CNC  
Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram submetidos anteriormente a uma preparação de usinagem para regularização da superfície onde seria feita a fixação dos mesmos através das castanhas da placa do torno. Esta preparação foi realizada em torno convencional, com parâmetros e ferramentas não controladas e não faz parte da análise de resultados deste estudo.

### 3.5.2 Fixação da ferramenta

O sistema de fixação do suporte da ferramenta no torno CNC é do tipo porta-ferramentas com troca manual. Neste sistema a fixação do suporte da ferramenta é realizada através de um porta-ferramentas, onde inicialmente o suporte é fixado, sendo na sequência fixado na torre do torno pelo processo de troca manual. A Figura 27 apresenta a forma de fixação do corpo de prova, suporte da ferramenta e do inserto de corte no equipamento torno CNC.

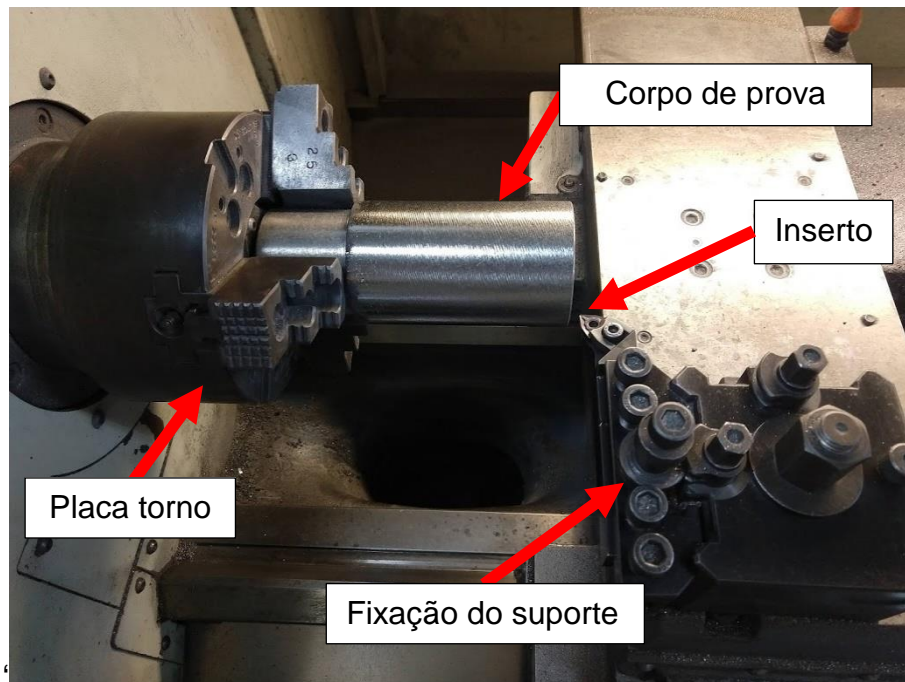


Figura 27 - Sistema de fixação do corpo de prova, do suporte da ferramenta e do inserto de corte no torno CNC.

Fonte: Autoria própria

### 3.5.3 Ensaio de usinagem

A estratégia de usinagem foi direcionada ao torneamento externo do corpo de prova. O comprimento útil de usinagem para a realização dos passes foi determinado em 120mm. Sendo assim, a cada passe realizado, o tempo de corte efetivo por passe ( $T_p$ ) em minutos e o comprimento de corte total ( $L_c$ ) em milímetros foram registrados. Quando atingido o desgaste máximo estipulado para a aresta, pode-se então determinar a vida da ferramenta ( $T$ ) em minutos e o comprimento de corte total ( $L_c$ ) em milímetros para os dois inserts e suas seis respectivas configurações de corte aplicadas.

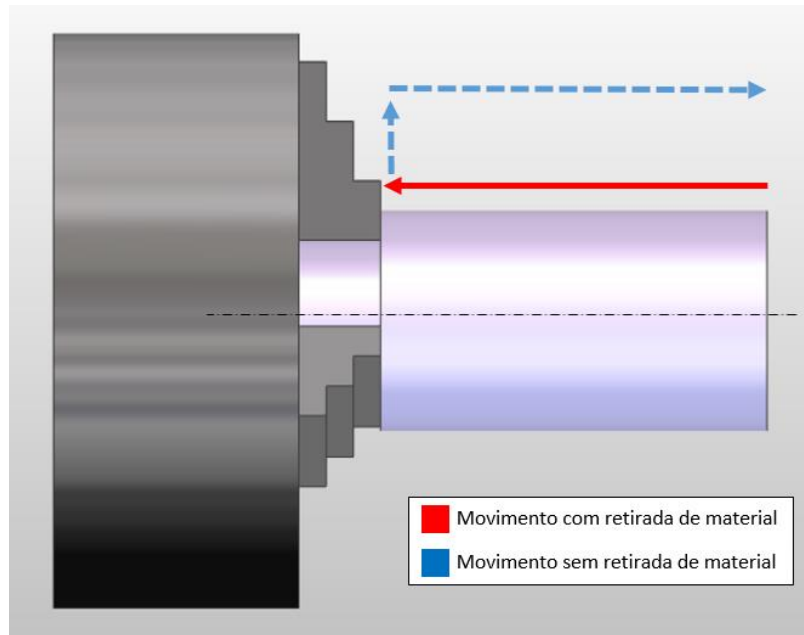


Figura 28 - Estratégia de corte no torneamento externo  
Fonte: Autoria própria

Após a conclusão de cada configuração de corte, uma nova aresta do inserto foi posicionada e um novo ensaio iniciado. Os ensaios foram realizados de acordo com o planejamento experimental com 06 configurações de corte para cada inserto e suas repetições.

#### 3.5.4 Programação CNC para usinagem

Com base no dimensional dos corpos de prova e da geometria disponível para os ensaios de usinagem, foi realizada a programação através do comando numérico Mach 9 seguindo a estratégia de usinagem e os parâmetros de corte definidos no planejamento experimental. O ciclo de velocidade de corte constante foi acionado nesta programação, visto assim obter a mesma velocidade de corte ( $v_c$ ) em todos os passes indiferente do diâmetro da peça. O avanço ( $f_n$ ) também foi programado para através do ciclo de torneamento com avanço programado, sendo este reduzido em 10% de seu valor na entrada de cada passe até o comprimento do diâmetro torneado atingir 3mm.

Todos os demais avanços do programa foram executados com a função de avanço rápido da máquina. Na programação não consta o ciclo de refrigeração visto

esta ser uma usinagem a seco. A cada final de passe, foi programado o posicionamento de afastamento estratégico da ferramenta possibilitando a remoção do inserto no suporte e a instalação do equipamento para medição da rugosidade do corpo de prova ainda fixado a placa do torno CNC.

### 3.5.5 Medição do desgaste das ferramentas

A cada passe realizado, o inserto em aplicação foi retirado do suporte e direcionado a uma bancada de avaliação montada ao lado do torno CNC, onde a medição de seu respectivo desgaste foi realizada através de um microscópio digital USB com aumento de até 1000x, devidamente calibrado através de seu software com uma precisão de medição de 0,01 mm e 01 (um) notebook no qual o microscópio digital estava conectado e executando o software CoolingTech® para captura das imagens da lupa. A Figura 29 demonstra o conjunto dos equipamentos para a avaliação e medição do desgaste do inserto.

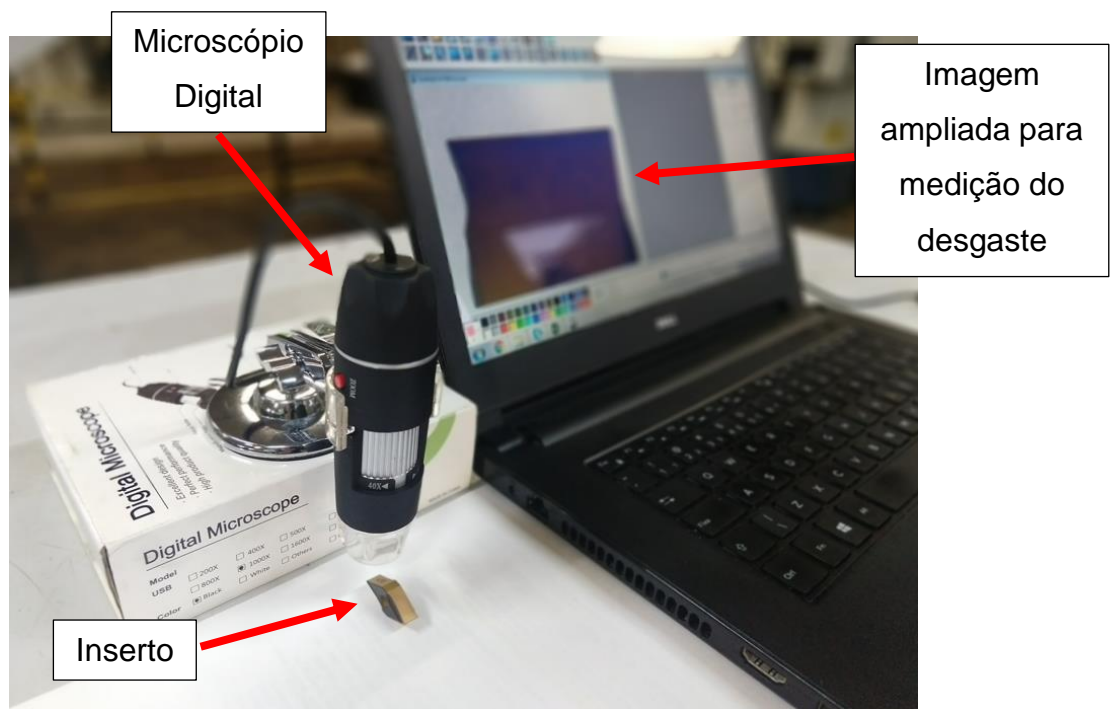


Figura 29 – Medição do desgaste dos insertos  
Fonte: Autoria própria

A vida da ferramenta ( $T$ ) foi determinada conforme norma ISO 3685, seguindo os critérios de vida da ferramenta de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) de 0,3 mm ou desgaste de flanco máximo ( $VB_{B \text{ Máx}}$ ) de 0,6 mm [42].

### 3.5.6 Medição da rugosidade

A rugosidade foi avaliada a cada término de passe, no sentido longitudinal do corpo de prova, sendo esta realizada sempre em 3 regiões (1, 2 e 3) marcadas pela posição das castanhas da placa pneumática do torno CNC. A Figura 30 apresenta o equipamento utilizado, modelo SJ-310 da marca MITUTOYO®, também devidamente calibrado a cada início de ciclo de trabalho.

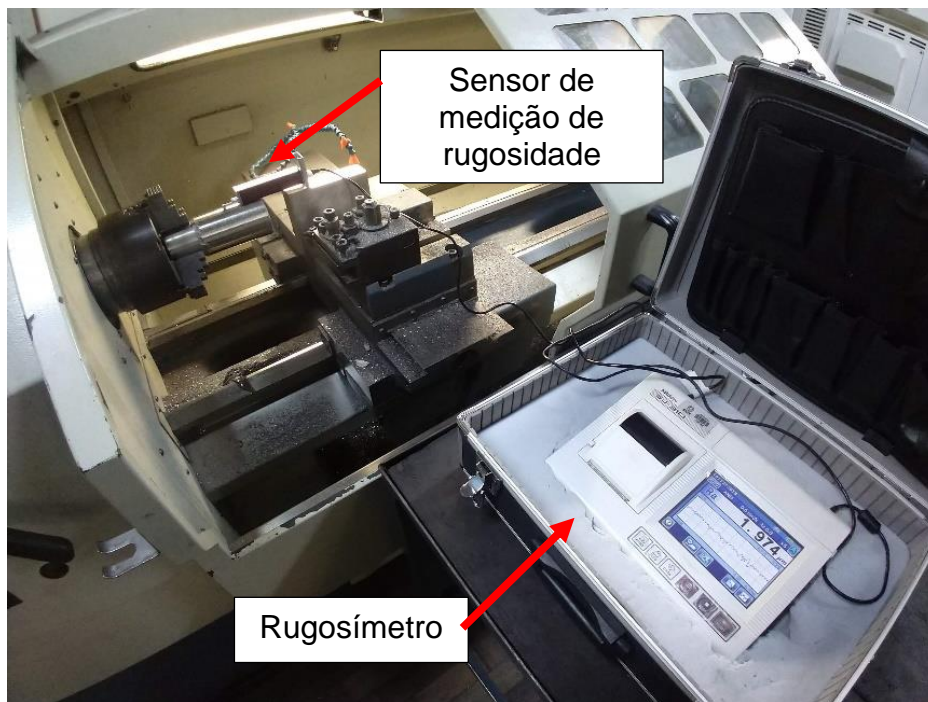


Figura 30 - Rugosímetro Portátil SurfTest SJ-310, Fabricante MITUTOYO  
Fonte: Autoria própria

Em cada uma das regiões foram executadas 03 medições de rugosidade, fornecendo como resultado uma média aritmética de cada uma das regiões e aumentando assim a amostragem dos resultados obtidos.

### 3.5.7 Análise termográfica

Durante a realização dos ensaios de usinagem, foram coletadas imagens termográficas da região de contato entre o inserto e o corpo de prova com o

equipamento câmera termográfica modelo TIS20+ da marca FLUKE®, afim de verificar quais as temperaturas máximas obtidas durante os ensaios. A câmera foi posicionada perpendicularmente à face usinada e as medições foram realizadas durante o processo de usinagem, acompanhando instantaneamente a temperatura gerada durante o tempo de corte (t) de cada passe nos corpos de prova.

### **3.5.8 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Após a conclusão dos ensaios de usinagem, os insertos utilizados foram submetidos ao Laboratório CTCL da UNISATC para uma investigação das arestas de corte utilizadas. O principal objetivo seria verificar a situação das mesmas perante possíveis ocorrências de fenômenos químicos durante os ensaios.

O equipamento utilizado para esta análise foi o microscópio de modelo MA10 série EVO da marca Carl Zeiss com EDS Quantax Bruker. Na região das arestas de corte, local onde ocorreu o desgaste, foram realizadas microanálises (composição química) através do EDS Quantax Bruker feita por intermédio da varredura por energia dispersiva EDS (Energy Dispersive Scanning) por aquisição do espectro de energia que incide sobre a superfície da amostra com a ampliação desejada e obtida através do microscópio e posteriormente feita a quantificação dos elementos constituintes da amostra.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos, na forma de tabelas e gráficos, para posteriormente serem analisados. Inicialmente serão apresentados os resultados de composição química e dureza dos corpos de prova fabricados. Na sequência, estão apresentadas as curvas de desgaste dos insertos em relação a vida da ferramenta (T) para os ensaios de usinagem nas configurações estabelecidas no capítulo anterior. Logo após são apresentadas as comparações entre desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ), comprimento de corte total ( $L_c$ ), taxa de remoção de material (Q) e rugosidade média ( $R_a$ ) dos dois insertos testados em função dos parâmetros de velocidade e avanço de corte.

Com a análise da composição química e dureza dos corpos de prova, junto ao acompanhamento das 6 configurações de corte aplicadas aos ensaios de usinabilidade e suas repetições, pode-se reunir os resultados e apresentá-los para uma melhor análise do estudo.

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DUREZAS OBTIDAS NOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram caracterizados afim de confirmar se a composição química resultante dos mesmos se encontra dentro dos limites estabelecidos pela norma ASTM A518 GR.3. Na Tabela 8 apresenta o resultado da composição química da corrida de fabricação dos corpos de prova.

Tabela 8 - Composição química da corrida de fabricação dos corpos de prova

Elemento	Corpo de Prova	ASTM A518 GR.3	
	% (Peso)	% (Peso) mín	% (Peso) máx
C	0,84	0,70	1,10
Mn	0,55	-	1,50
Si	14,72	14,20	14,75
Cu	0,48	-	0,50
Cr	4,95	3,25	5,00
Mo	0,017	-	0,20

Fonte: Autoria própria



A dureza dos corpos de prova também foi avaliada com o objetivo de verificar a homogeneidade entre os mesmos. O método utilizado para a medição de dureza dos corpos de prova foi o Brinell. Os valores das medições de dureza apresentaram resultados variando entre 350 a 375 HB. Os mesmos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dureza dos corpos de prova, medição pelo processo Brinell.

<b>01</b>	375 HB	<b>07</b>	375 HB
<b>02</b>	350 HB	<b>08</b>	375 HB
<b>03</b>	350 HB	<b>09</b>	375 HB
<b>04</b>	350 HB	<b>10</b>	375 HB
<b>05</b>	375 HB	<b>11</b>	350 HB
<b>06</b>	375 HB	<b>12</b>	375 HB

Fonte: Autoria própria

Visto ser esperado pela norma ASTM A518 GR.3 uma dureza próxima a 350 HB sem um limite máximo ou mínimo determinado, as peças foram consideradas aprovadas e, apresentaram uma boa homogeneidade entre si, detalhe importante para realização dos ensaios de usinabilidade nos corpos de prova fundidos.

Ensaio Não Destrutivo (NDT) de Líquido Penetrante (LP) também foram realizados afim de identificar a integridade da superfície do fundido, buscando isentar as peças de defeitos como trincas antes mesmos de chegar na usinagem.

Descontinuidades no material bruto são problemas comumente encontrados neste tipo de material devido a sua fragilidade. Na Figura 31 é possível avaliar o resultado de um dos corpos de prova após o ensaio de LP realizado.



Figura 31 - Corpo de prova bruto após ensaio não destrutivo de líquido penetrante  
Fonte: Autoria própria

Após a realização do ensaio de LP em todos os corpos de prova, os mesmos foram aprovados por não apresentarem descontinuidades na região externa, área de interesse para os estudos de usinagem deste trabalho.

#### 4.2 AVALIAÇÃO DO DESGASTE DOS INSERTOS

Como descrito na etapa de materiais e métodos, os corpos de prova foram submetidos a passes de torneamento externo com os 02 tipos de insertos de corte, sendo o tempo de cada passe registrado de acordo com seus parâmetros de corte. Após cada passe o inserto foi removido do seu devido suporte e realizada a análise de desgaste na aresta de corte.

A vida da ferramenta ( $T$ ) dos insertos foi definida conforme norma ISO 3685. Ao realizar a análise do inserto, estando ele com um desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) menor que o estipulado pela norma ISO 3685, um novo passe com as mesmas configurações no mesmo corpo de prova era aplicado. Desde modo, a vida da ferramenta ( $T$ ) foi definida com o somatório dos tempos de cortes ( $t$ ) realizados, com suas respectivas configurações de corte e seu corpo e prova até que o desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) chegasse ao valor igual ou superior ao estipulado pela norma.

Na Figura 32 pode-se comparar a análise de um inserto novo (a), ou seja, sem a existência de desgaste em sua aresta e o mesmo inserto já utilizado (b) para o teste de usinabilidade no final de sua vida de ferramenta.

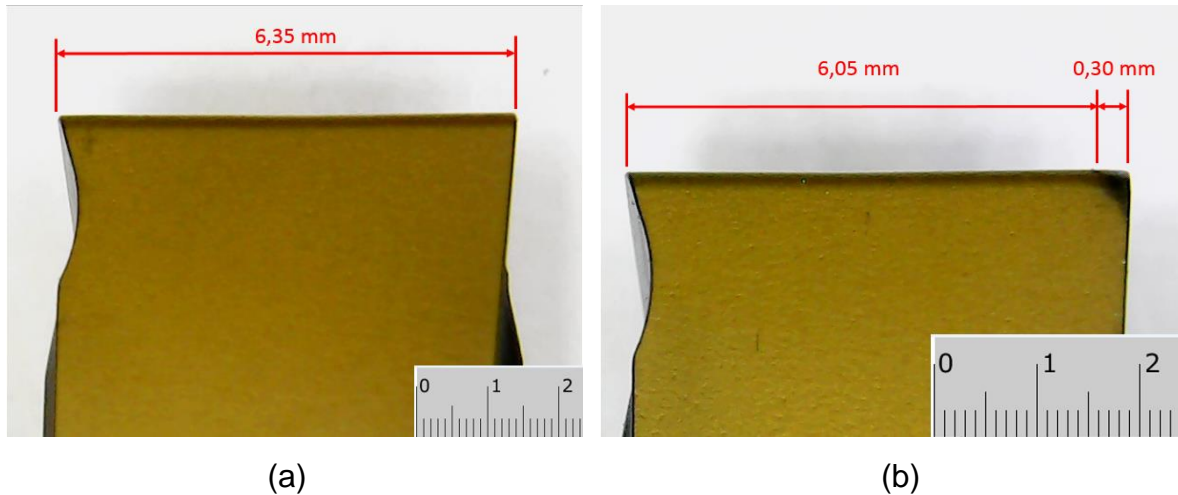


Figura 32 - (a) Aresta sem desgaste; (b) Aresta apresentando desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) estipulado pela norma ISO 3685.  
Fonte: Autoria própria

O exemplo do inserto apresentado na Fig. 32 trata-se do modelo DNMG 150604 RK4315, ensaiado nas configurações  $v_c 40 f_n 20$ , ou seja, Velocidade de corte ( $v_c$ ) de 40 m/min e avanço ( $f_n$ ) de 0,2 mm/rot após atingir desgaste de aresta igual a 0,3 mm.

#### 4.3 COMPORTAMENTO DO DESGASTE DE FLANCO MÉDIO ( $VB_B$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

A cada configuração de ensaio, uma série de passes foram realizados sendo o tempo de corte ( $t$ ), comprimento de corte total ( $L_c$ ), desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) e rugosidade da superfície ( $R_a$ ) controlados a cada término de passe. Nas Figuras 33 e 34, pode-se acompanhar a relação de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em relação as configurações de velocidades e avanços de corte utilizados nos ensaios, lembrando que para todas as configurações a profundidade de corte ( $a_p$ ) foi mantida fixa no valor de 0,5 mm.

Os resultados estão apresentados em dois gráficos, sendo cada um deles referente a um dos dois insertos utilizados.

Além da vida da ferramenta ( $T$ ), com a ajuda dos gráficos das Figuras 33 e 34 pode-se acompanhar o comportamento do desgaste do flanco durante a passagem do tempo para cada configuração de corte.

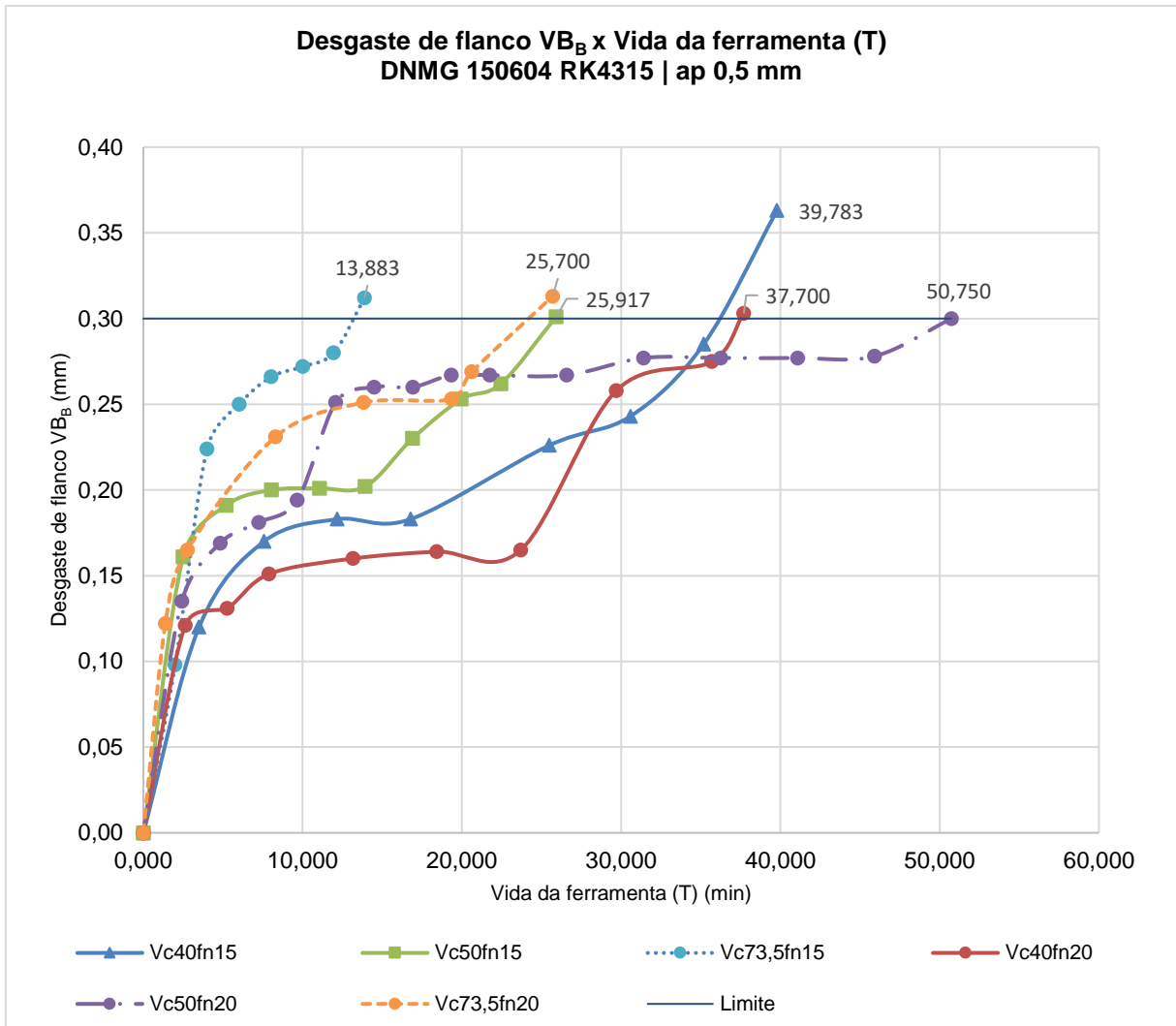


Figura 33 - Comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) durante os ensaios de usinagem com o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK®  
Fonte: Autoria própria

A vida da ferramenta (T) foi definida através da verificação do limite de desgaste no flanco  $VB_{B\text{MÁX}}$  conforme norma ISO 3685. Quando atingido o limite de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em 0,3mm, o ensaio daquela determinada configuração de corte estaria concluído.

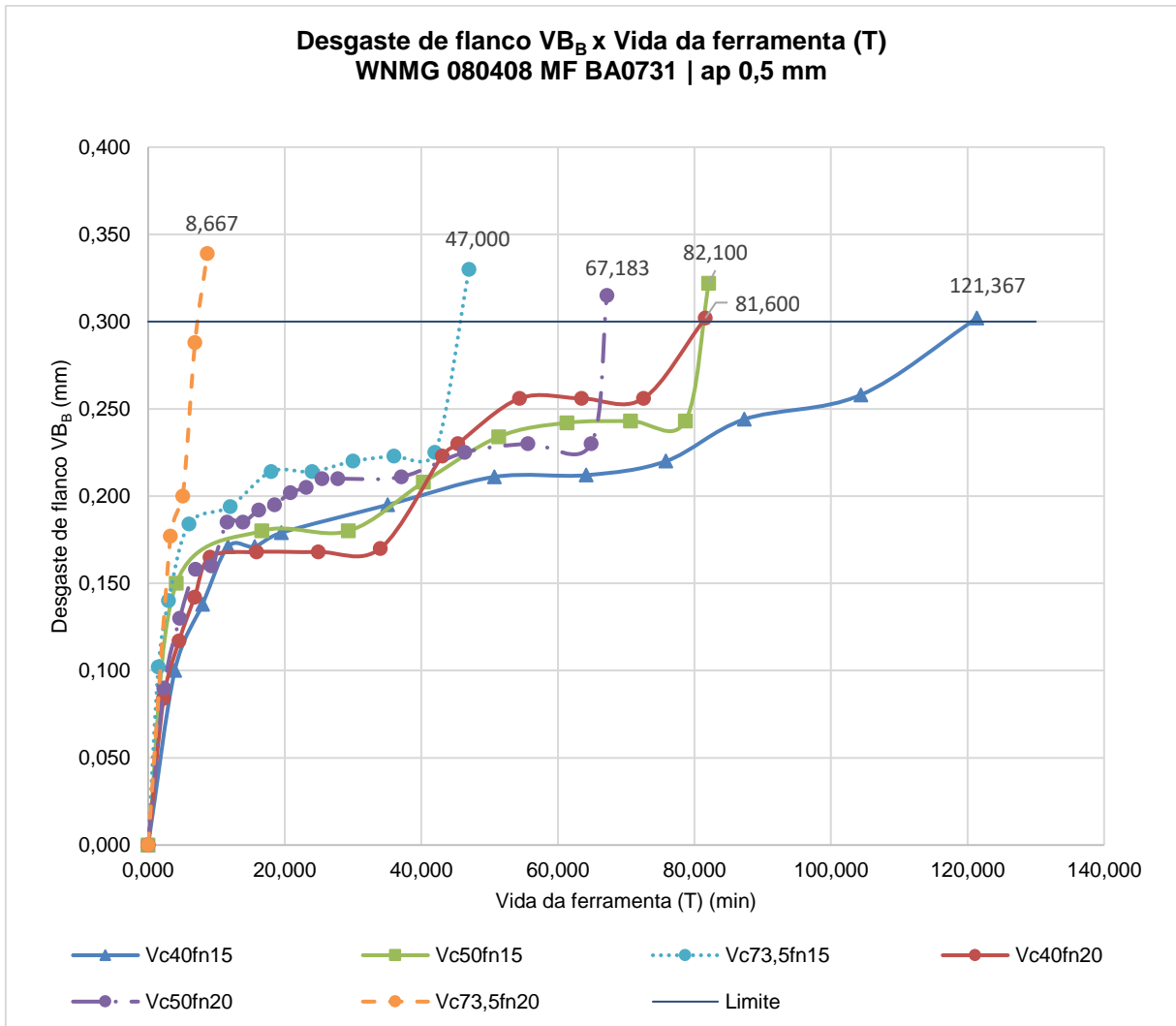


Figura 34 - Comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) durante os ensaios de usinagem com o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI®  
 Fonte: Autoria própria

Para cada curva de desgaste foram realizados um ensaio principal acompanhado de duas repetições, totalizando assim três ensaios para cada configuração de corte para cada um dos dois insertos.

As Figuras 33 e 34 apresentaram o comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em função da vida da ferramenta (T).

Na análise do inserto DNMG 150604 RK4315, as curvas de desgaste em função do tempo apresentaram menor variação entre si, com uma diferença de aproximadamente 37 minutos em comparação da maior e menor vida da ferramenta (T).

No caso do inserto WNMG 080408 MF BA0731, as variações nas condições de corte propuseram tempos máximos e mínimos de vida da ferramenta (T) com uma variação entre si de aproximadamente 113 minutos.

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em relação aos tempos de corte máximo obtidos e suas variações correspondentes.

Tabela 10 - Comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em relação aos parâmetros de corte utilizados para os dois insertos

Ensaio	Inserto	Config.	$V_c$ (m/min)	$f_n$ (mm/rot)	Média $VB_B$ (mm)	DP $VB_B$ (mm)	Média T (min)	DP T (min)
1	DNMG 150604 RK4315	$V_c40f_n15$	40,0	0,15	0,363	0,003	39,783	0,517
2	DNMG 150604 RK4315	$V_c50f_n15$	50,0	0,15	0,301	0,001	25,917	0,750
3	DNMG 150604 RK4315	$V_c73,5f_n15$	73,5	0,15	0,312	0,005	13,883	0,783
4	DNMG 150604 RK4315	$V_c40f_n20$	40,0	0,20	0,303	0,002	37,700	0,633
5	DNMG 150604 RK4315	$V_c50f_n20$	50,0	0,20	0,300	0,000	50,750	0,583
6	DNMG 150604 RK4315	$V_c73,5f_n20$	73,5	0,20	0,313	0,002	25,700	0,467
7	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c40f_n15$	40,0	0,15	0,302	0,002	121,367	0,533
8	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c50f_n15$	50,0	0,15	0,322	0,009	82,100	0,350
9	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c73,5f_n15$	73,5	0,15	0,330	0,009	47,000	0,200
10	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c40f_n20$	40,0	0,20	0,302	0,001	81,600	0,267
11	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c50f_n20$	50,0	0,20	0,315	0,007	67,183	0,267
12	WNMG 080408 MF BA0731	$V_c73,5f_n20$	73,5	0,20	0,339	0,008	8,667	0,183

Fonte: Autoria própria

A vida da ferramenta (T) é uma variável de resposta medida pelo comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) em relação aos parâmetros de corte utilizados, que ajuda a determinar as melhores configurações de corte para cada ferramenta e material a ser usinado. No caso deste estudo, buscou-se não somente

determinar vida da ferramenta ( $T$ ) e do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) mas sim a relação dos mesmos com outros parâmetros envolvidos no processo de usinagem, tais como o volume ( $\text{cm}^3$ ) de material usinado e a rugosidade média ( $R_a$ ) obtida.

#### 4.4 VIDA DA FERRAMENTA ( $T$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

Seguindo o método de verificação anteriormente demonstrado e com todas as 6 configurações de corte ensaiadas, um dos objetivos deste trabalho foi determinar a vida dos insertos em estudo para cada uma das configurações de corte utilizadas. Na Figura 35 estão apresentados graficamente os comportamentos das vidas de ferramenta dos insertos perante estas combinações apresentadas na Tabela 10.

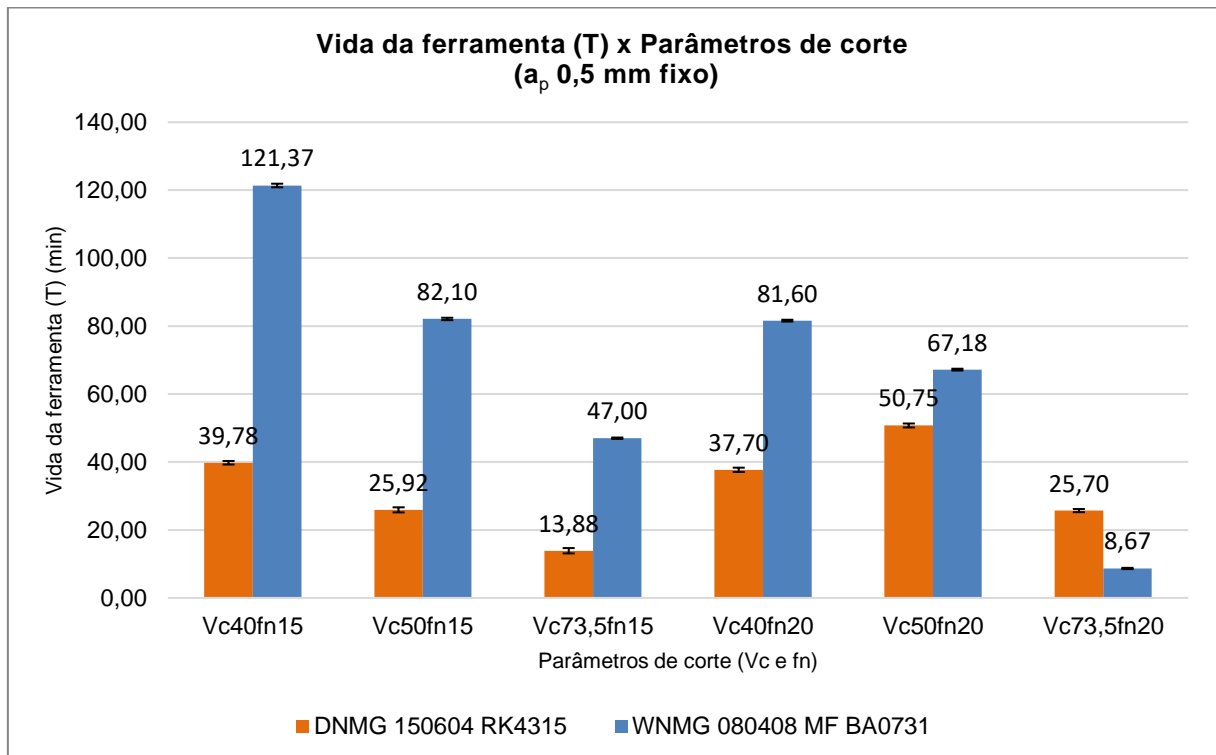


Figura 35 - Vida da ferramenta ( $T$ ) em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  (m/min) e  $f_n$  (mm/rot) para os dois insertos utilizados

Fonte: Autoria própria

A vida da ferramenta ( $T$ ) padrão informada pelos fabricantes de ambos os insertos foram de 15 minutos, porém este tempo é um valor genérico utilizado apenas como referência para usinagem de materiais da específica classe do inserto informada e parâmetros estabelecidos nas especificações dos insertos conforme indicado nas Figuras 22 e 23.

As variações de parâmetros de corte utilizadas para ambos os insertos apresentaram vidas de ferramenta bem distintas, variando entre 8 minutos até uma vida da ferramenta (T) com mais de 120 minutos.

Neste caso, a vida da ferramenta (T) não deve ser avaliada isoladamente dos demais resultados, visto se tratar de um dado muito importante, estes dados precisam ser cruzados com os demais resultados, a fim de se obter um melhor entendimento do efeito dos parâmetros de corte neste estudo e usinagem.

É possível de se identificar a tendência da redução da vida da ferramenta (T) do inserto com o aumento da velocidade de corte e do avanço de corte para as configurações do inserto WNMG 080408 MF BA073.

Já para o inserto DMNG 150604 RK4315, esta relação se fez presente apenas nas configurações com avanço de corte de 0,15 mm/rot. Para as configurações que utilizaram avanço de 0,20 mm/rot, a velocidade de corte intermediária de 50 m/min apresentou a maior vida da ferramenta (T) para este inserto.

Desde modo, pode-se afirmar um comportamento no desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) e na vida da ferramenta (T) distinto dos demais ensaios para o inserto DMNG 150604 RK4315 nas configurações com avanço de corte de 0,2 mm/rot.

#### 4.5 COMPRIMENTO DE CORTE TOTAL ( $L_c$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

Com relação ao comprimento de corte total ( $L_c$ ) dado em mm, o mesmo pode ser avaliado para cada configuração de corte aplicada aos insertos com base no controle dos passes realizados. O comprimento de corte total ( $L_c$ ) pode por sua vez ser analisando em conjunto com a vida da ferramenta (T) na determinação da vida dos insertos.

O inserto DMNG 150604 RK4315 apresentou seu maior comprimento de corte total ( $L_c$ ) de 2520 mm na configuração  $v_c50f_n20$ , já o inserto WNMG 080408 MF BA073 apresentou o maior comprimento de corte total ( $L_c$ ) de 4320 mm na configuração de corte  $v_c40f_n20$ .

Para ambos os insertos, pode-se identificar uma estabilidade do comprimento de corte total ( $L_c$ ) para as configurações com avanços de corte de 0,15 mm/rot. Quando realizada esta mesma análise para as configurações com avanço de corte de 0,2 mm/rot, nota-se que os maiores comprimentos de corte máximos ( $L_c$ ) foram



obtidos nas mesmas velocidades de corte com os maiores tempos de corte máximos (T) para ambos os insertos. Na Figura 36 estão demonstradas as relações entre os comprimentos de corte máximos ( $L_c$ ) e os tempos de corte máximos para cada uma das configurações de corte.

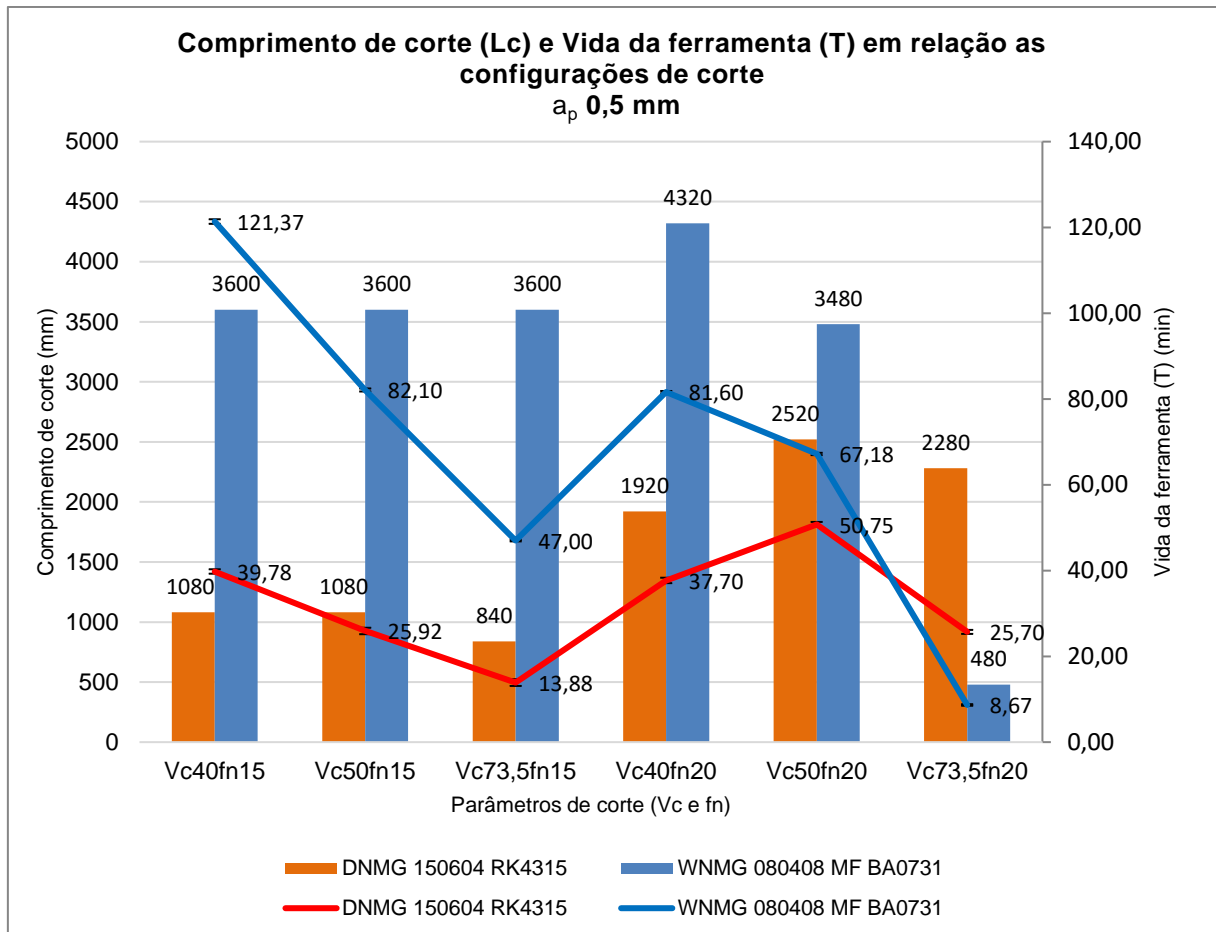


Figura 36 - Comportamento do comprimento de corte total ( $L_c$ ) e da vida da ferramenta (T) em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  (m/min) e  $f_n$  (mm/rot)

Fonte: Autoria própria

Para a situação encontrada em ambos os insertos nas configurações de corte com avanço de corte ( $f_n$ ) de 0,15 mm/rot, pode-se determinar que os valores de comprimento de corte total ( $L_c$ ) encontrados dizem respeito ao limite de comprimento de corte total para os insertos nas faixas de velocidades de corte ( $v_c$ ) aplicadas.

Nas configurações de corte com avanço de corte ( $f_n$ ) de 0,2 mm/rot, a relação entre os resultados da vida da ferramenta (T) e comprimento de corte total ( $L_c$ ) indicam as melhores velocidades de corte ( $v_c$ ) para ambos os insertos na faixa de avanço de corte em questão quando se levando em conta o desgaste da ferramenta.

#### 4.6 TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL (Q) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

Nesta análise, foram comparados os valores da taxa de remoção entre as 6 configurações realizadas. A taxa de remoção de material na usinagem é calculada em função da velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f_n$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). Visto que a profundidade de corte foi mantida para todos os ensaios realizados, os parâmetros de influência neste momento foram o avanço e a velocidade de corte. Na Figura 37 podemos encontrar os valores das taxas de remoção apresentados.

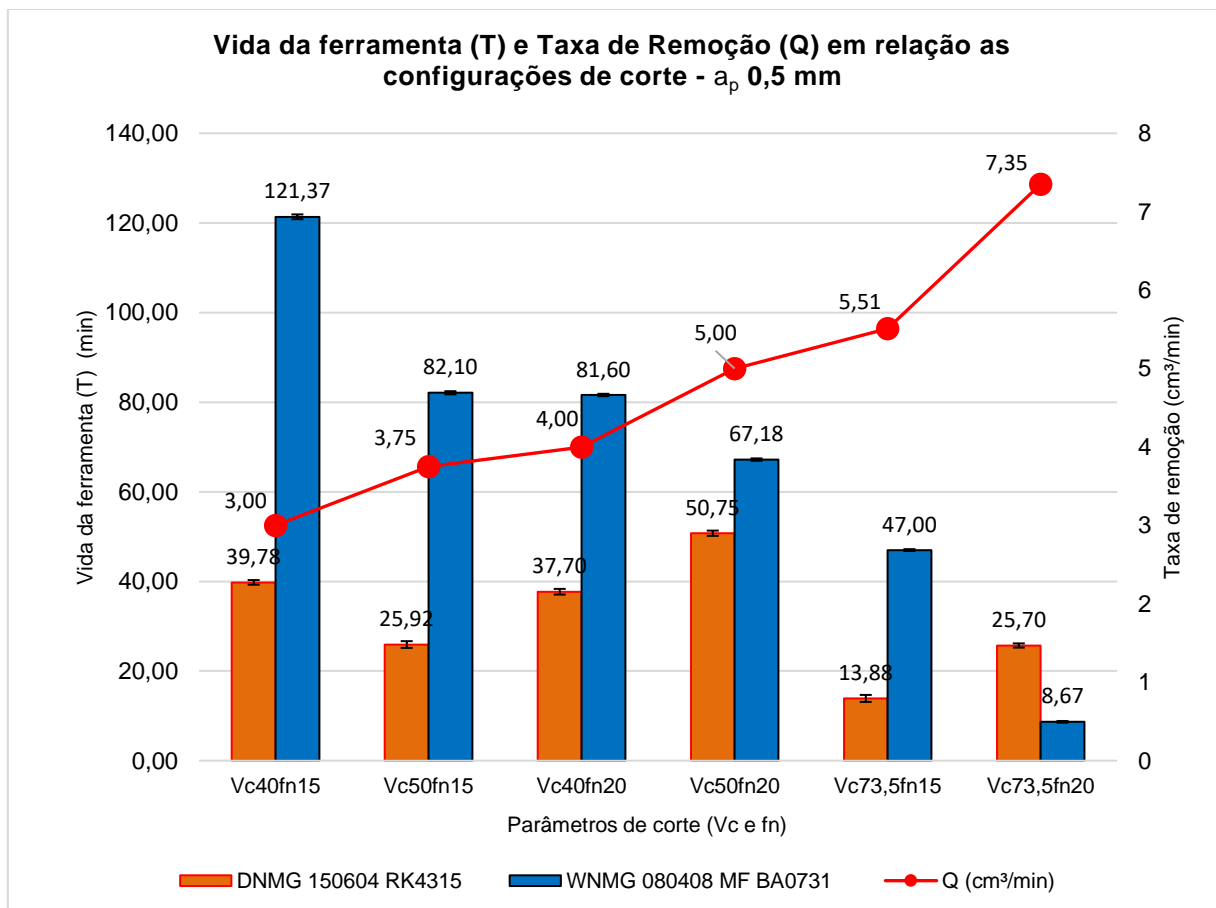


Figura 37 - Vida da ferramenta (T) e Taxa de remoção (Q) resultante em relação as configurações de corte  $v_c$  e  $f_n$

Fonte: Autoria própria

A maior taxa de remoção (Q) foi obtida com a configuração  $v_c73,5f_n20$ , ou seja, os valores máximos de avanço (0,2 mm/rot) e de velocidade de corte (73,5 m/min) utilizados, resultando em uma taxa de remoção de 7,35  $\text{cm}^3/\text{min}$ .

Já a menor taxa de remoção foi encontrada na configuração  $v_c=40$ fn15, apresentando valor de  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$ . O comportamento do desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) e da vida da ferramenta (T) em relação à taxa de remoção de material (Q) apresentaram-se inversamente proporcionais, ou seja, com um aumento da taxa de remoção, a vida da ferramenta (T) reduziu drasticamente para o inserto WNMG 080408 MF BA073.

Quando analisado o mesmo comportamento para o inserto DMNG 150604 RK4315, não se pode determinar alguma relação lógica entre o aumento da taxa de remoção (Q) em relação a vida da ferramenta (T), visto a oscilação dos mesmos ao decorrer do aumento da taxa de remoção.

#### 4.7 VOLUME USINADO EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

Uma segunda análise quanto as taxas de remoção de material (Q) pode ser realizada neste estudo quando relacionamos os volumes reais de material usinado em relação a vida da ferramenta (T). Esta análise, torna-se importante na avaliação do desempenho dos insertos quanto a produtividade dos mesmos. Os resultados foram divididos por tipo de inserto para uma melhor apresentação e estão demonstrados nas Figuras 38 e 39.

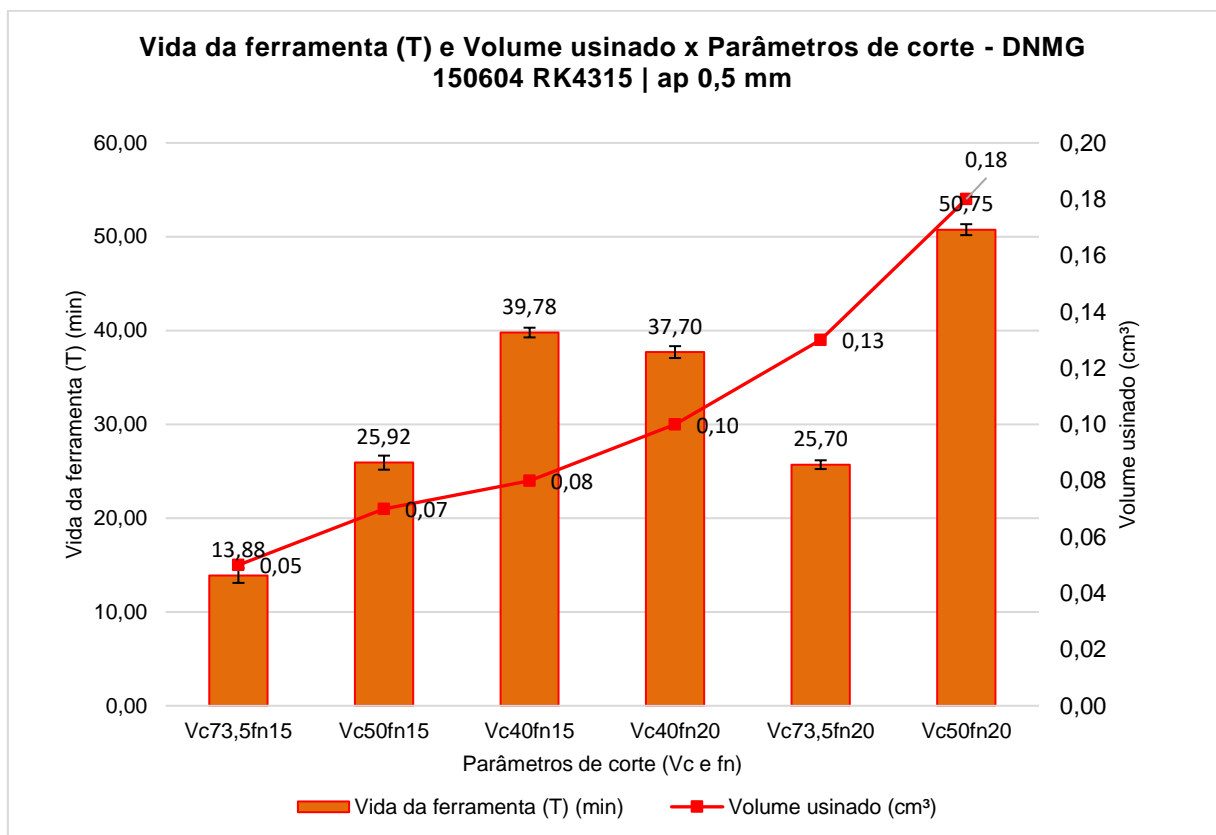


Figura 38 - Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  e  $f_n$  para o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK®  
Fonte: Autoria própria

Nos resultados apresentados na Figura 38 para o inserto DNMG 150604 RK4315, foram calculados os volumes usinados ao final de cada ensaio, quando o inserto atingiu seu desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) estipulado, tendo neste momento a informação de sua vida da ferramenta (T). O inserto em questão apresentou seus melhores resultados quanto ao volume usinado ( $\text{cm}^3$ ) e a vida da ferramenta (T) na configuração de corte  $v_c50f_n20$ . Se analisado a Figura 36, pode-se identificar que o

maior comprimento de corte total foi obtido com esta mesma configuração. Já os menores valores encontrados para as duas variáveis resposta analisadas ocorreram com a configuração  $v_c73,5f_n15$ , que também por sua vez apresentou o menor comprimento de corte total para todas as 6 configurações que este inserto foi testado. A mesma análise foi realizada para o inserto WNMG 080408 MF BA073 e esta apresentada na figura 39.

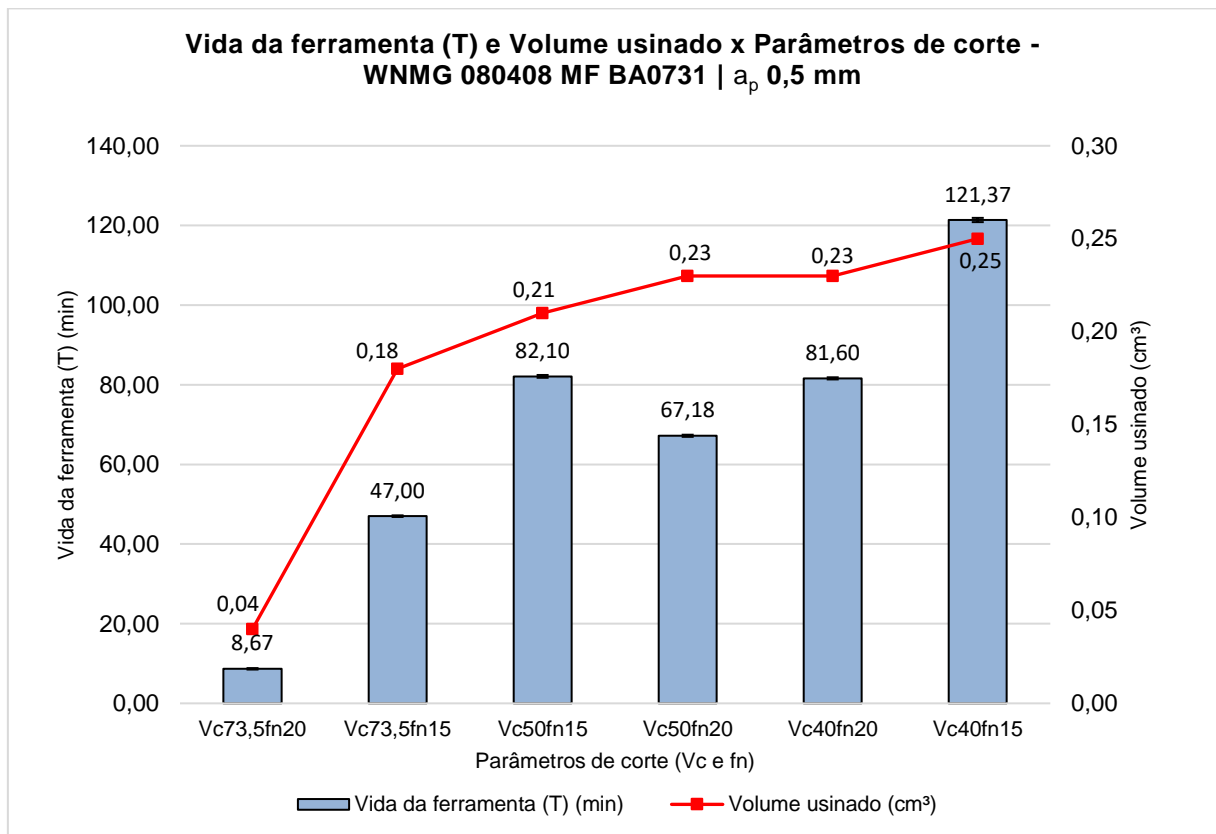


Figura 39 - Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  e  $f_n$  para o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI®  
Fonte: Autoria própria

Para este inserto, a configuração  $v_c40f_n15$  apresentou os maiores valores de volume usinado ( $cm^3$ ), vida de ferramenta (T) e comprimento de corte total ( $L_c$ ). Os menores valores para as três variáveis anteriormente citadas ocorreram na configuração  $v_c73,5f_n20$ .

#### 4.8 RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ ) EM RELAÇÃO AOS PARÂMETROS DE CORTE

A rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) dos corpos de prova foi calculada através das medições realizadas durante os passes de usinagem executados em cada uma das configurações de corte aplicadas, sendo considerada a última medição da configuração quando o desgaste do inserto exceder o limite de desgaste de flanco médio ( $VB_B$ ) 0,3 mm considerado para este estudo. Os resultados destas medições podem ser avaliados nas Figuras 40 e 41, separados por tipo de inserto.

Para o inserto DNMG 150604 RK4315, as rugosidades médias ( $R_a$ ) encontradas para as 6 configurações de corte aplicadas apresentaram valores entre 1,6  $\mu\text{m}$  com a velocidade de corte ( $v_c$ ) mais baixa de 40 m/min e chegando até 3,5  $\mu\text{m}$  com o aumento da velocidade de corte ( $v_c$ ) para 73,5 m/min.

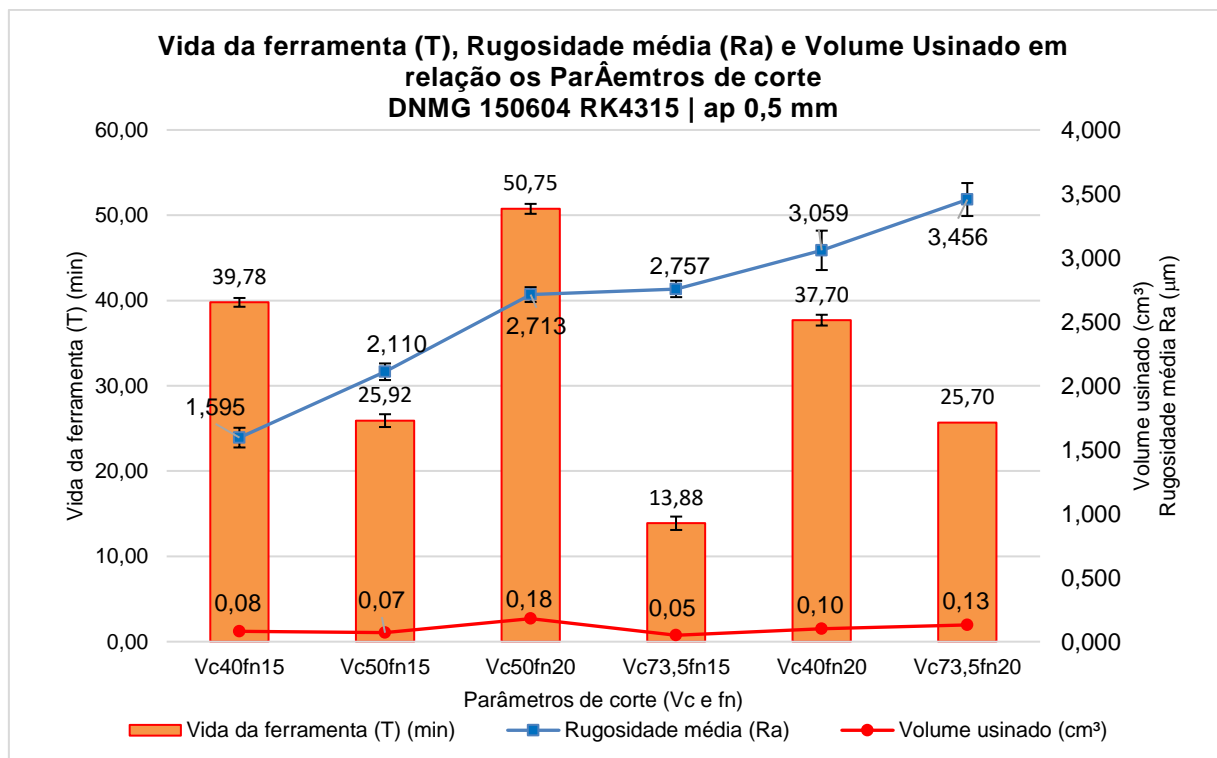


Figura 40 - Rugosidade média ( $R_a$ ), Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  e  $f_n$  para o inserto DNMG 150604 RK4315, fabricante SANDVIK®

Fonte: Autoria própria

Na avaliação do comportamento da rugosidade média ( $R_a$ ) para o inserto WNMG 080408 MF BA073, os valores encontrados apresentaram valores entre 2,7  $\mu\text{m}$  com a velocidade de corte ( $v_c$ ) mais alta 73,5 m/min e chegando até 4,1  $\mu\text{m}$  com a redução da velocidade de corte ( $v_c$ ) para 50 m/min. Os valores de rugosidade média

( $R_a$ ) para a velocidade de corte ( $v_c$ ) 40 m/min foram de 3,8  $\mu\text{m}$  para avanço ( $f_n$ ) de 0,2 mm/rot e 3,3  $\mu\text{m}$  para avanço ( $f_n$ ) de 0,15 mm/rot.

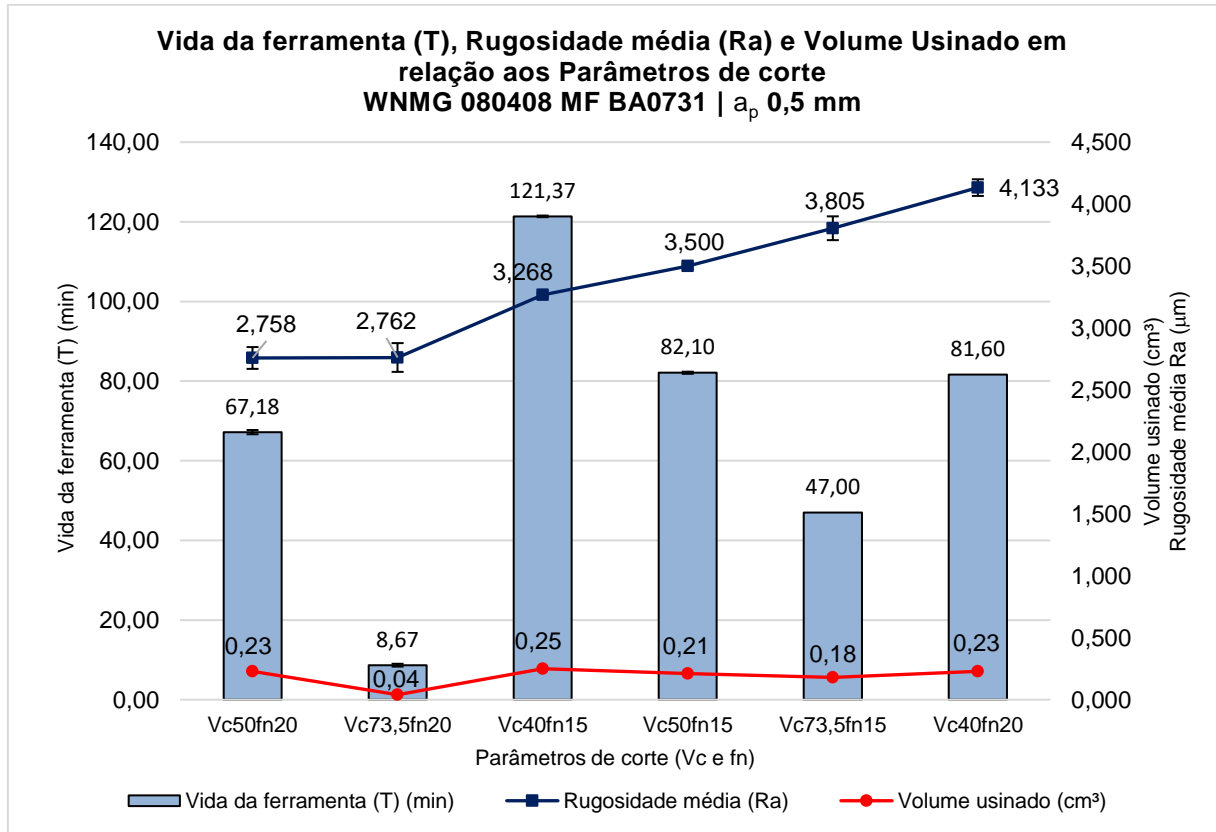


Figura 41 - Rugosidade média ( $R_a$ ), Vida da ferramenta (T) e Volume usinado em relação aos parâmetros de corte  $v_c$  e  $f_n$  para o inserto WNMG 080408 MF BA0731, fabricante BF BURZONI®  
Fonte: Autoria própria

Pode-se perceber que o inserto DMNG 150604 RK4315 apresentou em seus resultados de rugosidade média ( $R_a$ ) valores abaixo dos encontrados para o inserto WNMG 080408 MF BA073. Esta relação tem sentido quando avaliado a diferença do raio de ponta entre os mesmos. O primeiro inserto possui raio de ponta ( $r_e$ ) 0,4mm, já o segundo, 0,8mm. Para o inserto com raio de ponta menor a tendência é que a rugosidade seja menor.

Não se pode determinar uma relação direta entre a variação da taxa de remoção de material (Q) com a rugosidade média ( $R_a$ ) encontrada para as seis configurações de ambos os insertos.

#### 4.9 ANÁLISE TERMOGRÁFICA

Durante os ensaios de usinagem, a temperatura da região de corte, foi avaliada com o objetivo de acompanhar o controle térmico da região de contato entre o corpo de prova e o inserto. As temperaturas foram verificadas para cada configuração de corte. A Figura 42 apresenta a imagem termográfica coletada para um dos ensaios.

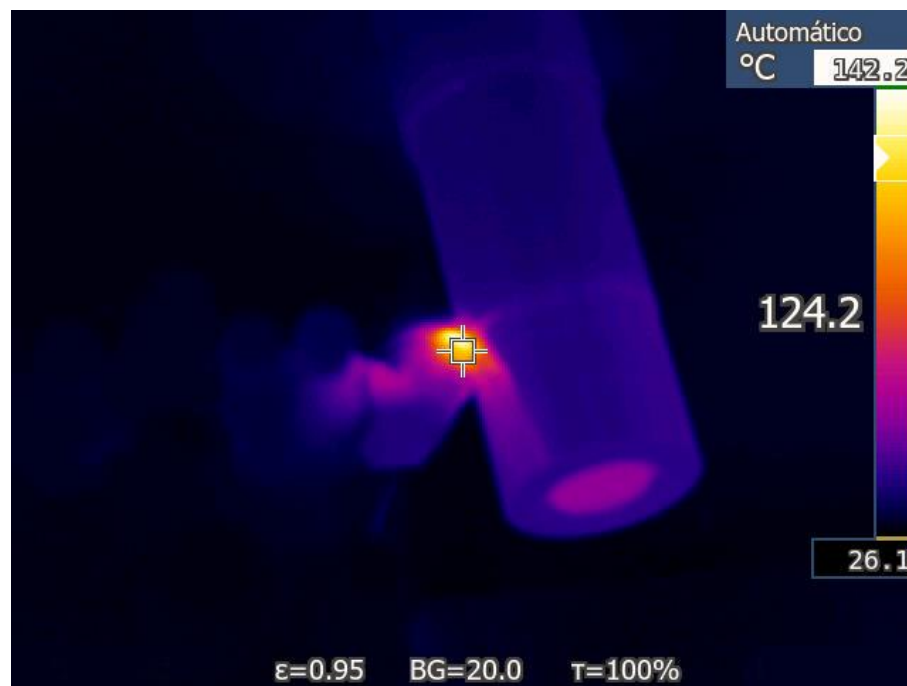


Figura 42 - Análise termográfica durante o ensaio de torneamento na configuração  $v_c73,5f_n20$  com o inserto WNMG 080408 MF BA0731. Temperatura ambiente no ato da medição: 21°C  
Fonte: Autoria própria

A máxima temperatura obtida durante os ensaios foi encontrada no ensaio de configuração  $v_c73,5f_n20$ , sendo ela 124,2 °C. Todas as medições para as demais configurações apresentaram valores abaixo, porém muito próximos deste valor máximo mensurado.



#### 4.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) APLICADA NA REGIÃO DE DESGASTE DO INSERTO

Como ensaio adicional foi realizado análise em Microscópio eletrônico de varredura (MEV) da aresta de corte do inserto que apresentou menor vida da ferramenta (T). O principal objetivo deste ensaio adicional foi verificar a situação da aresta de corte ao final da vida, bem como a possível presença de materiais aderidos durante os processos de desgaste ocorridos neste processo de torneamento externo. Na Figura 43, pode-se identificar a aresta de corte utilizada no teste com configuração  $v_c73,5fn15$ .

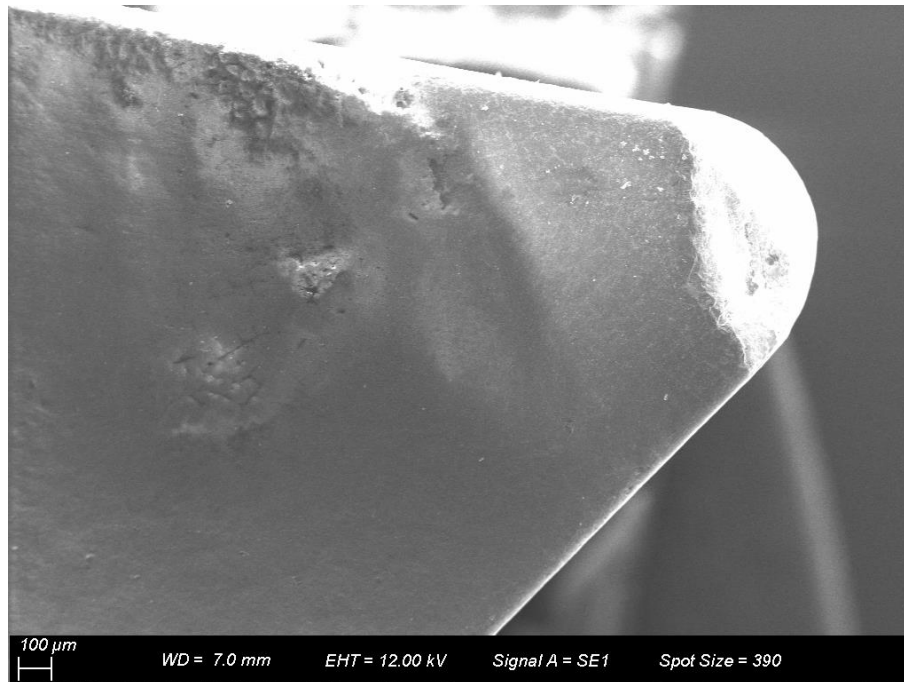


Figura 43 - Imagem do MEV para o inserto DNMG 150604 RK4315. Inserto utilizado no ensaio de configuração  $v_c73,5fn15$   
Fonte: Autoria própria

Com uma maior aproximação, a região de desgaste foi identificada e determinados os pontos para análise de composição química. As análises foram realizadas em duas principais regiões: Região apresentando desgaste e região sem a presença de desgaste.

Na Figura 44 estão apresentados estes pontos com suas respectivas indicações para posteriormente correlacionarmos com a tabela de resultados das composições químicas.

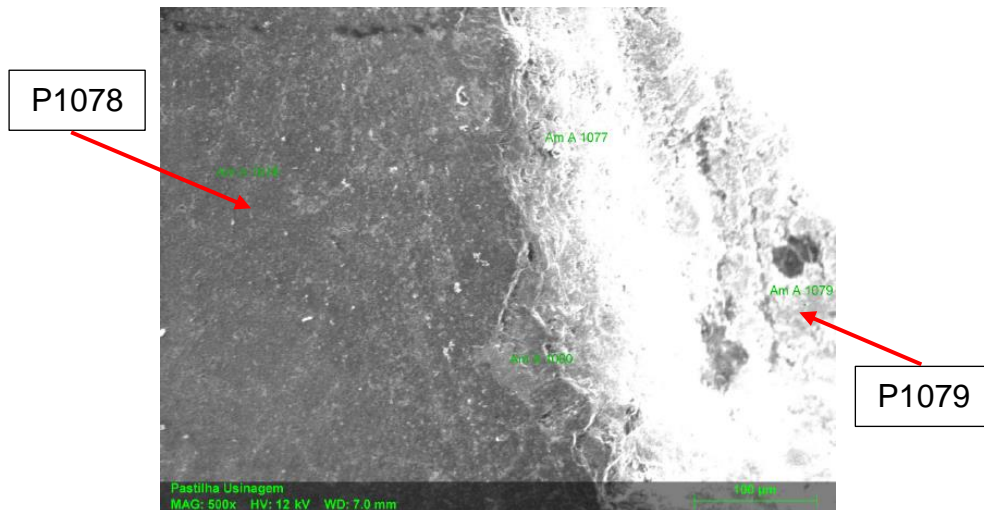


Figura 44 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 – Ponto MEV  
Fonte: Autoria própria

O primeiro ponto a ser analisado foi o denominado P1078, região fora da zona de desgaste. Abaixo na Figura 45 temos o resultado da composição química neste ponto.

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	abs. error [%] (2 sigma)	abs. error [%] (3 sigma)	rel. [%]
Oxygen	8	K-Serie	54636	61.37	38.83	56.06	7.21	14.42	21.64	
Aluminium	13	K-Serie	86862	38.68	24.48	20.95	1.79	3.58	5.36	
Bromine	35	L-Serie	44249	31.51	19.94	5.76	1.48	2.95	4.43	
Iron	26	K-Serie	2348	10.72	6.79	2.81	0.48	0.97	1.45	
Carbon	6	K-Serie	2884	9.68	6.13	11.78	1.71	3.43	5.14	
Silicon	14	K-Serie	5636	3.73	2.36	1.94	0.19	0.38	0.58	
Chromium	24	K-Serie	500	1.23	0.78	0.35	0.10	0.20	0.30	
Manganese	25	K-Serie	257	0.85	0.54	0.23	0.09	0.18	0.27	
Sodium	11	K-Serie	266	0.16	0.10	0.10	0.04	0.08	0.13	
Nickel	28	K-Serie	11	0.09	0.05	0.02	0.05	0.11	0.16	
Cobalt	27	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Nitrogen	7	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>Sum</b>				<b>158.03</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>				

Figura 45 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 no ponto P1078  
Fonte: Autoria própria

Pode-se identificar na análise de composição química pontual que o elemento químico silício (Silicon, na Figura 45) apresentar baixa presença no resultado, estando ele apenas como elemento residual nesta região. O segundo ponto analisado foi o 1079, tratando-se da região desgastada durante o ensaio de usinagem. A Figura 46 apresenta os resultados da composição química deste ponto.

Element	At. No.	Line s.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [%] (1 sigma)	abs. error [%] (2 sigma)	abs. error [%] (3 sigma)	rel. (1)
Iron	26	K-Serie	8337	65.22	67.51	46.43	2.43	4.86	7.28	
Silicon	14	K-Serie	12509	15.90	16.46	22.51	0.70	1.41	2.11	
Carbon	6	K-Serie	1133	6.98	7.23	23.11	1.55	3.11	4.66	
Chromium	24	K-Serie	1426	5.52	5.71	4.22	0.27	0.55	0.82	
Tungsten	74	M-Serie	491	1.03	1.06	0.22	0.10	0.20	0.29	
Oxygen	8	K-Serie	436	1.02	1.06	2.54	0.32	0.65	0.97	
Manganese	25	K-Serie	104	0.57	0.59	0.41	0.09	0.18	0.27	
Aluminium	13	K-Serie	278	0.34	0.36	0.51	0.06	0.11	0.17	
Nitrogen	7	K-Serie	3	0.02	0.02	0.05	0.04	0.08	0.12	
Nickel	28	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Sodium	11	K-Serie	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<b>Sum</b>				<b>96.60</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>				

Figura 46 - Análise do inserto DNMG 150604 RK4315 no ponto P1079  
Fonte: Autoria própria

Diferente da primeira análise, para o ponto P1079 pode-se identificar na análise de composição química pontual que o elemento químico silício (Silicon, na Figura 46) apresenta 15,9 % (em massa) da região analisada. Esta presença do elemento silício (Silicon na Figura 46) no resultado da análise química do inserto pode estar ligada com a presença de partículas do material da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3 aderidas ao inserto durante a operação de usinagem, caracterizando desta forma, além do desgaste de flanco médio (VB<sub>B</sub>) identificado neste estudo para determinação da vida da ferramenta (T), podendo sim existir a presença de outros tipos de desgaste nos ensaios de usinagem realizados, tais como o desgaste por adesão.

#### 4.11 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Com base nos resultados das análises anteriormente apresentadas, a Tabela 11 foi elaborada apresentando assim as variáveis de entrada para cada configuração de ensaio realizado e seus respectivos resultados obtidos.

Tabela 11 - Resumo dos parâmetros de corte e resultados obtidos para cada configuração dos ensaios de usinagem

Ensaio	Inserto	Config.	Desgaste VB <sub>BMAX</sub> (mm)		Vida da ferramenta (T) (min)		Rugosidade R <sub>a</sub> (μm)		Vol. Usinado (cm <sup>3</sup> )
			Média	DP	Média	DP	Média	DP	
1	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 40fn15	0,363	0,003	39,78	0,52	1,595	0,077	0,08
2	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 50fn15	0,301	0,001	25,92	0,75	2,110	0,065	0,07
3	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 73,5fn15	0,312	0,005	13,88	0,78	2,757	0,064	0,05
4	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 40fn20	0,303	0,002	37,70	0,63	3,059	0,154	0,10
5	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 50fn20	0,300	0,000	50,75	0,58	2,713	0,058	0,18
6	DNMG 150604 RK4315	V <sub>c</sub> 73,5fn20	0,313	0,002	25,70	0,47	3,346	0,129	0,13
7	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 40fn15	0,302	0,002	121,37	0,53	3,268	0,011	0,25
8	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 50fn15	0,322	0,009	82,10	0,35	3,500	0,020	0,21
9	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 73,5fn15	0,330	0,009	47,00	0,20	3,805	0,096	0,18
10	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 40fn20	0,302	0,001	81,60	0,27	4,133	0,067	0,23
11	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 50fn20	0,315	0,007	67,18	0,27	2,758	0,088	0,23
12	WNMG 080408 MF BA0731	V <sub>c</sub> 73,5fn20	0,339	0,008	8,67	0,18	2,762	0,116	0,04

Fonte: Autoria própria

A Tabela 11 nos traz um resumo dos resultados encontrados neste estudo. Com a análise da mesma, pode-se afirmar que o inserto WNMG 080408 MF BA0731 com os parâmetros de corte  $v_c 40 \text{fn} 15$  apresentou a maior vida da ferramenta (T) para os ensaios de torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3.

Desta forma, se analisado esta configuração que resultou na maior vida da ferramenta (T), pode-se afirmar também que foi a configuração que a apresentou a maior taxa de remoção (Q), ou seja, que removeu o maior volume de material da peça durante os ensaios de usinagem entre todas as configurações.

Já a menor vida da ferramenta (T) foi identificada com o mesmo inserto WNMG 080408 MF BA0731, porém com parâmetros de corte  $v_c 73,5 \text{fn} 20$ , apresentando assim uma relação direta entre o aumento dos parâmetros de corte e a redução da vida da ferramenta (T).

O menor valor de rugosidade foi encontrado com o inserto DNMG 150604 RK4315 na configuração de corte  $v_c 40 \text{fn} 15$ . Além desta configuração apresentar o menor avanço aplicado como nível de estudo, este inserto possui raio de ponta ( $r_\epsilon$ ) de 0,4 mm, o que auxiliou na obtenção deste resultado de menor rugosidade dentre as configurações apresentadas. Porém, para esta configuração, o volume de material removido foi baixo, cerca de  $0,08 \text{ cm}^3$  e a vida da ferramenta (T) foi de um pouco mais de 39 minutos.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos no estudo conclui-se que:

- ✓ Com os ensaios preliminares realizados a este estudo para definição do melhor inserto de corte, pode-se confirmar que para os 6 insertos testados e suas respectivas configurações de corte, existe um limitante no valor da profundidade de corte ( $a_p$ ), onde para valores superiores a 0,5 mm, o lascamento do material do corpo de prova ocorre frequentemente durante a usinagem de torneamento externo;
- ✓ Referente as velocidades de corte ( $v_c$ ) utilizadas neste estudo, os ensaios foram realizados com valores de 40, 50 e 73,5 m/min. Comparados com a velocidade de corte sugerida pelo fabricante para usinagem do material ferro fundido com o inserto DNMG 150604 RK4315 (260 m/min), as velocidades de corte utilizadas neste estudo foram reduzidas devido aos resultados obtidos nos testes preliminares, tais como quebra do inserto, lascamento do corpo de prova e até mesmo colapso do corpo de prova;
- ✓ Pode-se identificar que o avanço de corte ( $f_n$ ) de 0,15 mm/rot resultou em uma maior vida da ferramenta para duas das três velocidades de corte ( $v_c$ ) aplicadas, sendo a maior vida da ferramenta ( $T$ ) encontrada foi com velocidade de corte ( $v_c$ ) de 40 m/min e com o avanço anteriormente citado conforme apresentado na Tab.11;
- ✓ Se a vida da ferramenta ( $T$ ) fosse a única variável de saída a ser avaliada neste estudo, poder-se-ia concluir que a configuração  $v_c40f_n0,15$  seria a melhor configuração de corte entre as seis avaliadas, porém outros resultados e variáveis de saída foram avaliadas neste estudo para se obter uma melhor definição;
- ✓ O parâmetro rugosidade apresentou resultados com pouca variação entre as configurações de corte testadas. Confirmando o que a literatura nos apresenta, a menor rugosidade média ( $R_a$ ) foi encontrada com o menor avanço de corte aplicado  $v_c40f_n15$ . Pode-se perceber uma relação direta entre o aumento da rugosidade média ( $R_a$ ) com o aumento da velocidade de corte e do avanço para os experimentos, exceto para a configuração de

corte  $v_c 40 f_n 20$ . Pela relação lógica apresentada, esta configuração deveria apresentar a segunda menor rugosidade média ( $R_a$ ). O resultado encontrado mostra que para esta configuração a relação anteriormente encontrada não se fez presente, onde ela resultou uma rugosidade considerada como a segunda maior de todas seis configurações;

- ✓ Visto que na grande maioria dos projetos de peças fabricadas neste material que solicitam torneamento externo a rugosidade máxima ( $R_a$ ) solicitada é de  $6,35 \mu\text{m}$ , pode-se afirmar que todas as configurações de corte apresentaram resultados satisfatórios;
- ✓ Em relação a taxa de remoção ( $Q$ ), para as configurações e parâmetros de corte aplicadas neste estudo, a mesma apresentou resultados entre 3 a  $7,35 \text{ cm}^3/\text{min}$ . As taxas de remoção foram calculadas em função da velocidade de corte ( $v_c$ ) e o avanço de corte ( $f_n$ ) aplicados a cada configuração. Para a maior taxa de remoção ( $Q$ ) encontrada  $7,35 \text{ cm}^3/\text{min}$ , na configuração de corte ( $v_c 73,5 f_n 20$ ), pode-se identificar uma das menores vidas da ferramenta ( $T$ ), aproximadamente 8,67 minutos para o inserto WNMG 080408 MF BA0731. Já para a menor taxa de remoção ( $Q$ ) encontrada que foi de  $3 \text{ cm}^3/\text{min}$  na configuração ( $v_c 40 f_n 15$ ), obteve-se a maior vida de ferramenta ( $T$ ), cerca de 121,37 minutos para o mesmo inserto WNMG 080408 MF BA0731. Desta forma, pode concluir que a taxa de remoção é uma propriedade que está diretamente relacionada com a vida da ferramenta ( $T$ );
- ✓ Relacionando a configuração da maior taxa de remoção ( $Q$ ) encontrada ( $v_c 73 f_n 20$ ) com a configuração que teve a maior vida de ferramenta ( $v_c 50 f_n 20$ ) encontrada, pode-se identificar uma redução de 32% na taxa de remoção ( $Q$ ). Realizando a comparação entre as mesmas condições acima citadas, pode-se identificar um aumento de 97% na vida da ferramenta ( $T$ ) para  $v_c 50 f_n 20$  em relação a  $v_c 73 f_n 20$ , ou seja, quase o dobro.
- ✓ Após o cálculo das taxas de remoção ( $Q$ ) uma nova análise pode ser realizada referente ao volume de material removido durante os ensaios. A configuração que apresentou o maior volume de material removido foi a

$v_c40f_n15$ , removendo cerca de  $0,25 \text{ cm}^3$  durante o tempo de vida da ferramenta (T).

- ✓ Pode-se afirmar que a menor rugosidade encontrada foi com a configuração  $v_c40f_n15$  com os parâmetros de velocidade de corte ( $v_c$ ) 40 m/min, avanço de corte ( $f_n$ ) 0,15 mm/rot e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm, aplicados ao inserto DNMG 150804 RK4315, apresentando o valor de rugosidade média da superfície (Ra) de  $1,595 \mu\text{m}$  no torneamento externo dos corpos de prova fabricados na liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3;
- ✓ Já a maior vida de ferramenta (T) e a o maior volume usinado também foram encontrados com a configuração  $v_c40f_n15$  com os parâmetros de velocidade de corte ( $v_c$ ) 40 m/min, avanço de corte ( $f_n$ ) 0,15 mm/rot e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,5mm, porém aplicados ao inserto WNMG 080408 MF BA0731, apresentando uma vida da ferramenta (T) de 02:01:22 h e volume usinado de  $0,25 \text{ cm}^3$  no torneamento externo dos corpos de prova fabricados na liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3;



## 6 PESQUISAS FUTURAS

Para ampliar o estudo apresentado, sugere-se para trabalhos futuros a avaliação de outros aspectos tais como:

- ✓ Aprofundar os estudos no inserto que apresentou maior vida da ferramenta e maior volume usinado, buscando estudar a fundo outros tipos de desgaste que possam estar ocorrendo na ferramenta;
- ✓ Aumentar a opção de insertos a serem testados, variando raio de ponta ( $r_\epsilon$ ), geometria e cobertura dos mesmos, com o objetivo de buscar resultados ainda melhores dos que foram encontrados;
- ✓ Realizar ensaios de usinagem avaliando através de sensores as forças de corte resultantes em cada configuração, buscando a obtenção de melhores resultados no desgaste dos insertos de corte;
- ✓ Agregar a análise técnica-financeira ao estudo de usinabilidade realizado, buscando auxiliar na definição do melhor inserto e melhores parâmetros de corte buscando definir o melhor custo x benefício para a usinagem por torneamento externo da liga especial fundida conforme norma ASTM A518 GR.3;

## REFERENCIAS

- [1] VIECELE - Soluções de Usinagem. A indústria Metalúrgica em 2023. Disponível em: <https://vieceliusinagem.com.br/a-industria-metalurgica-em-2023/> Acesso em 30 de set de 2023.
- [2] FGV. Indústria de transformação brasileira: À beira da extinção, 2022. Disponível em: <https://portal.fgv.br/artigos/industria-transformacao-brasileira-beira-extincao> Acesso em 30 de set de 2023.
- [3] MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Metalurgia e Siderurgia, 2012. Disponível em: <http://mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/contatos/9-assuntos/categ-comercio-exterior/477-metarlurgia-e-siderurgia> Acesso em 30 de set de 2023.
- [4] MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos materiais**. Editora Blucher, São Paulo, 2015.
- [5] SHAW, M. C.; COOKSON, J. O. **Metal cutting principles**. New York: Oxford university press, 2005.
- [6] ARRAZOLA, P. J. et al. Recent advances in modelling of metal machining processes. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, p. 695–718, 2013.
- [7] JAIN, H. et al. Optimisation and evaluation of machining parameters for turning operation of Inconel-625. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 2306-2313, 2015.
- [8] SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento**. 2004. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, p. 44- 69, 2004.
- [9] ALBUQUERQUE, K. Y. de A. **Estudo da vida de ferramentas de corte em processos de usinagem através de modelos de confiabilidade**, 2018. Monografia (Engenharia Química), João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba. 1–31, 2018.
- [10] KENNAMETAL. **Cast iron turning guide**. 98p, 2003.
- [11] American Society for Testing and Materials – ASTM. ASTM A518-05: standard specification for corrosion-resistant high-silicon iron castings. West Conshochen: ASTM; 2005. p. 1-5.
- [12] SMITH, W. F. **Principles of Materials Science and Engineering**. .

[13] INFOMET. **Elementos de liga nos ferros fundidos cinzentos. Ferros fundidos ligados.** Elementos de Liga Nos Ferros Fundidos Cinzentos. Ferros Fundidos Ligados, 2020. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=148> Acesso em: 14 mar 2023.

[14] ASM International. ASM Metals handbook. Volume 09 - **Metallography And Microstructures**, 1972.

[15] ALTONA. **Altona, “Ligas fundidas de ferro silício.”** 2002.

[16] ASM International. ASM Metals handbook. Volume 13: **Corrosion:** Vol. 9º Ed. 1987.

[17] Ferraresi, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1970.

[18] KAWI, A. A. Temperatures Behavior of Some Alloy Steels in Turning Process Under Different Operating Conditions. **Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences**, v. 4, n. 3, 2011.

[19] TRENT, M. C.; WRIGHT, P. K.. **Metal Cutting Principles** – 4th edition, Butterworth – Heinemann, USA, 2000.

[20] MEIRELES, G. S. C. **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados em operações de usinagem visando o monitoramento de linhas ou células de produção.** 2000, 97f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade. São Carlos, 2000.

[21] KOSARAJU, S.; VIJAY KUMAR, M.; SATEESH, N. Optimization of Machining Parameter in Turning Inconel 625. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 5343–5348, 2018.

[22] XAVIER, F. A. **Aspéctos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN.** 2003. Dissertação Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

[23] LEKAKH, S. N.; FINN, M. E., METALWORKING, F., & SOLUTIONS, C. Machining. **Cast Iron Science and Technology**, v.1(c), p. 319–334, 2018.

[24] HIOKI, D. **Usinagem dura do aço 100Cr6 com PCBN**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

[25] SANTOS, G. R. **Caracterização de Filme DLC e Avaliação dos Esforços de Usinagem em Insertos Revestidos no Torneamento de Ligas Al-Si**. 2006. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.

[26] MACHADO, A.; SILVA, M. B. Usinagem dos Metais. Apostila, DEEME – UFU, Uberlândia, p 174, 2004.

[27] HURTS, J.E.; RILLEY, R. V. The microstructure of comercial acid-resisting silicon – iron alloys. **Journal of Iron and Steel Institute**, v. 151, p. 172–180, 1946.

[28] FUOCO, R.; MARIOTTO, C. L.; ALBERTIN, R. Evolucao da tecnica de producao de ferros fundidos de alto silicio. **Metalurgia ABM**, v. 44, n. 368, p. 694-98, 1988.

[29] SUGIYAMA, N. Tratamento térmico do ferro fundido de alto silício. **Metalurgia ABM**, v. 24, p. 29–35, 1968.

[30] BORBA, R. B. **Estudo da Influência das Afições em Brocas Escalonadas de Canal Reto na Furação da liga de Alumínio SAE306**. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado)- Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-R, 2013.

[31] TELES, J. M. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. Itajubá, 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, 2007.

[32] PARREIRAS, L. G. **Avaliação dos esforços de corte no torneamento da liga de alumínio-silício (A356) com diferentes anteligas**. 2014. Dissertação de Mestrado.–Universidade Federal São João del-Rei, p. 1-117, 2014.

[33] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2014. 270 p.

[34] GONZÁLEZ, L. W. R.; RODRÍGUEZ, R. P.; ROBLEDO, P. C. Z.; MATA, M. P. G.; DUMITRESCU, L. náalisis experimental del torneado de alta velocidad del acero AISI 1045. **Ingeniería Mecánica**, v. 15, n. 1, p. 10-22, 2012.

- [35] VIANA, R. DESEMPENHO DE REVESTIMENTOS DE BROCAS NA USINAGEM DE UMA LIGA Al-Si, 1995.
- [36] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**. 2º Edição. Alcan Alumínio do Brasil, São Paulo, 1991.
- [37] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 4º Edição. Editora da UFSC. 1995.
- [38] CIMM. **Ângulos medidos no Plano Ortogonal**, 2020. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3569-angulos-da-ferramenta#:~:text=in%20your%20browser.-,%C3%82ngulos%20medidos%20no%20Plano%20Ortogonal,flanco%20principal%2C%20medido%20no%20Po](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3569-angulos-da-ferramenta#:~:text=in%20your%20browser.-,%C3%82ngulos%20medidos%20no%20Plano%20Ortogonal,flanco%20principal%2C%20medido%20no%20Po). Acesso em 14 mar 2023.
- [39] NOVASKI, O.; DÖRR, J. Usinagem sem refrigeração. **Máquinas e Metais**, v. 35, N. 398, p 18-27, 1999.
- [40] RODRIGUES, A. R. **Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte**. 2005, 227f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo, 2005.
- [41] AMORIM, H. J. **Estudo da Relação entre Velocidade de Corte, Desgaste de Ferramenta, Rugosidade e Forças de Usinagem em Torneamento com Ferramenta de Metal Duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- [42] ISO. Tool Life Testing with Single Point Turning, ISO 3685, 1993.
- [43] COHEN, P. H.; MARWANGA, R. O.; VOGT, R. C. Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons. **AFS Transactions**, p. 651-661, 2000.
- [44] REUTER, U. et al. **Wear Mechanisms in High-Speed Machining**. In: COMPACTED GRAPHITE IRON – MACHINING WORKSHOP, 1999.
- [45] COELHO, R.T.; SILVA, E. J. **Temperatura na formação de cavacos e aplicação de fluidos de corte em usinagem**, 2020, 63p. Disponível em:

[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5336326/mod\\_resource/content/1/7-Temperatura%20em%20Usinagem%20de%20Metais.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5336326/mod_resource/content/1/7-Temperatura%20em%20Usinagem%20de%20Metais.pdf). Acesso em: 14 mar 2023.

[46] MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte. **Máquinas e Metais**. v. 37, n. 419, p. 134 – 151, 2000.

[47] SILVA, O. M. M. **Processamento e caracterização do nitreto de silício aditivado com carbonato de ítrio e concentrado de terras raras**. 2000, 169f. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. FEG–UNESP, SP, 2000.

[48] NARUTAKI, N. et al. A new advanced ceramic for dry machining. **CIRP Annals**, v. 46, n. 1, p. 43-48, 1997.

[49] LANNA, M. A. et al. Torneamento de ferro fundido cinzento com ferramentas cerâmicas à base de nitreto de silício produzidas por sinterização normal. **Anais 48º CBC**, p. 1 - 10, 2004.

[50] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B.; BARBA JUNIOR, D. J.; KISH, M. Qualidade superficial e formação de cavacos na usinagem de Al e Cu. **Máquinas e Metais**, p.82-89,1994.

[51] MARQUES, D. C. Estudo da influência do teor de níquel na usinabilidade de ligas Fe- Cr-Ni. 2007, 95 p. Dissertação (Mestrado), Campinas: Unicamp, 2007.

[52] DINIZ, A, E.; COPPINI, N. L.; VILELLA, R. C.; RODRIGUES, A, C. S. - Otimização das condições de usinagem em células. **Máquinas e Metais**, p. 48 - 54, 1989.

[53] COROMANT, S. Apostila de treinamento em tecnologia de usinagem, 2017.

[54] FERRER, J. A. G. **Uma contribuição ao fresamento frontal de superfícies irregulares de ferro fundido cinzento**. Tese de Doutorado: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2006.

[55] BEZERRA, A. A. **Estudo do desgaste no roscamento com alta velocidade em ferro fundido**. 2003. Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

[56] Faria, J. **Estudo da usinagem em torneamento da superliga a base de níquel NIMONIC 80**. Aleph, 2007.

[57] KOPAČ, Janez. Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 78, n. 1-3, p. 95-103, 1998.

[58] BOEHS, L.; CASTRO, P. A. R. A.. Planejamento Técnico no Gerenciamento de Ferramentas - Estudos de caso em empresas do setor metal-mecânico brasileiro. In: V - CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2008, Salvador. Anais - V - CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro : ABCM, 2008. v. 1. p. 1-10

[59] DELIER, A.W. **Melhoria no processo de usinagem em torno CNC**. Panambi RS, 2015. 50 p. Monografia (Pós-graduação) – Faculdade INJUI, Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul, 2015.

[60] ISO. **INTERNATIONAL STANDARD ISO: 1832**. 2004.

[61] CHILDS, T.; MAEKAWA, K.; OBIKAWA, T.; YAMANE, Y. **Metal machining theory and applications**. 1th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.

[62] MILLS, B.; REDFORD, A. H. **Machinability of Engineering Materials**. Applied Science Publishers, London, 1983.

[63] HASTINGS, W. F.; OXLEY, P. L. B. Predicting tool life from fundamental work material properties and cutting conditions. **Ann CIRP**, v. 25, n.1, p. 33–38, 1976.

[64] OPITZ, H.; KÖNIG, W. ON THE WEAR OF CUTTING TOOLS. **In Advances in Machine Tool Design and Research**, p.173 - 190, 1968.

[65] ARSECULARATNE, J. A.; ZHANG, L. C.; MONTRO, C. Wear and tool life of tungsten carbide , **PCBN and PCD cutting tools**.n. 46, p. 482–491, 2006.

[66] CHOUDHURY, I. A.; EL-BARADIE, M. A. Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 95, n. 1-3, p. 30-39, 1999.

[67] HERTZSCH, A.; KRÖGER, K.; TRUCKENBRODT, H. **Microtopographic analysis of turned surfaces by model-based scatterometry**. v. 26, p. 306–313, 2002.

[68] SA, W. B. **An investigation of tool wear in high-speed turning of AISI 4340 steel.** p. 330–334, 2005.

[69] ALMEIDA, M. C. **Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) no Torneamento do Aço-de-Corte- Fácil ABNT 12L14.** Itajubá, 2005, 152 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2005.

[70] XAVIER, F. A. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009..

[71] DIETER, G. **Mechanical Metallurgy**, London: Mc. Graw Hill Book, 1988.

[72] GONDIM, R. M. **Aplicação da distribuição de Weibull no monitoramento da operação de torneamento.** Uberlândia, 2008. 103 p. Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

[73] SILVA, L. A. A.; FERREIRA, J. R. Otimização do torneamento curvilíneo de anéis de pistão de ferro fundido nodular com ferramenta especial de metal duro. **Anais CONEM**, 2010. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1440.pdf> Acesso em 18 de mar 2023.

[74] MIRANDA, G. W. A. **Uma contribuição para aplicações em controle adaptativo otimizado no torneamento.** 1997, 100f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1997.

[75] ZEILMANN, R. P.; NICOLA, G. L.; FINIMUNDI, A. V. . S. R. Diferentes condições de uso de fluidos lubrificantes e refrigerantes. **Revista Máquina e Metais**, n. 494, Aranda editora, p. 110-123.

[76] SIHVO, I.; VARIS, J. The wear of single flute gun drill and tool life tests. **Mechanika**, v. 73, n. 5, p. 1207-1392, 2008.

[77] VAXEVANIDIS, N. M.; FOUNTAS, N. A.; KOUTSOMICHALIS, A.; KECHAGIAS, J. D. Experimental investigation of machinability parameters in turning of CuZn39Pb3 brass alloy, **Procedia Struct. Integr.**, v. 10, pp. 333–341, 2018.



[78] TEDESCO, M. E. **Variação dimensional e microestrutura do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento**. 2007, 83f. Tese (Mestrado Em Engenharia e Ciência Dos Materiais)-Universidade de Caxias Do Sul, Caxias Do Sul, 2007.

[79] MAGRI, A. **Uma Contribuição Ao Estudo Do Torneamento Da Liga 625**. 99f, 2015. Dissertação de mestrado (Engenharia Mecânica) Universidade Estadual De Campinas, Faculdade De Engenharia Mecânica, 2015.

[80] JAVIDI, A.; RIEGER, U.; EICHLSEDER, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. **International Journal of Fatigue**. v. 30, n. 10-11, p. 2050-2055, 2008.

[81] BURZONI, B. Catálogo Ferramentas Torneamento, p. 6–69, 2018.

[82] SANDVIK, **Pastilha T-max para Torneamento DNMG 150604 RK 4315, Folheto técnico**, pp. 4–5, 2019.

[83] BLACK, J. T. Introduction to machining processes. In: **METAL HANDBOOK**. VOL. 16: Machining. 9.ed. Washington: ASM International, p.1-4, 1994.

[84] BOX G. E. P., DRAPER, N. R.; **Statistical Method for Process Improvement**; New York, John Wiley & Sons, 1987.

[85] PAIVA, A. P. D. Estudo da minimização de erro nas medições de concentração de emulsões por titração Karl-Fisher utilizando-se projeto de experimentos. 2004, 215f. Dissertação de mestrado em Ciências em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, 2004.