

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

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO NO DESGASTE
DE INSERTOS DE CORTE UTILIZADOS PARA O DESCASCAMENTO DE
BARRAS LAMINADAS**

CARLOS DAROIT
Engenheiro Metalúrgico

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia

Porto Alegre

2009

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

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

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE PROCESSO NO DESGASTE
DE INSERTOS DE CORTE UTILIZADOS PARA O DESCASCAMENTO DE
BARRAS LAMINADAS**

CARLOS DAROIT
Engenheiro Metalúrgico

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Siderurgia.

Porto Alegre

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, Modalidade Profissional, Especialidade Profissional e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Rocha

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Alvares Spim Junior, UFRGS

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito, UFRGS

Dr. Luis Augusto Colembergue Klujszo, Gerdau Aços Especiais

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGEM

Porto Alegre, outubro de 2009.

Dedico este trabalho a Emeli, minha fonte de
inspiração

AGRADECIMENTOS

À minha família, fonte inesgotável de estímulo, carinho, ajuda e compreensão em todos os momentos;

À Gerdau Aços Especiais, Unidade Charqueadas, pela oportunidade de aprendizado e desenvolvimento profissional;

À equipe da Transformação Mecânica, em especial aos colegas da descascadeira DMH4, sempre dispostos a auxiliar e motivados a melhorar a cada dia;

Ao professor Dr. Alexandre Rocha pelo conhecimento e orientação recebida durante o trabalho;

Aos colegas Jair Leopoldo Janoski e Eng. Rafael Zimmermann Stefani, especialistas em suas atividades.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Processo de usinagem.....	6
2.1.1. Processo de descascamento de barras laminadas	6
2.1.1.1. Rolos de tração e guias de entrada	10
2.1.1.2. Cabeçote de descascamento.....	11
2.1.1.3. Guias de saída e carro de tração	12
2.2. Insertos / Ferramentas de corte.....	13
2.2.1. Geometrias.....	13
2.2.2. Materiais para substrato.....	18
2.2.3. Revestimentos.....	21
2.3. Fluido de corte refrigerante	25
2.3.1. Tipos de fluidos de corte	25
2.3.2. Temperatura de corte	26
2.3.3. Concentração do fluido de corte.....	30
2.3.4. Vazão do fluido de corte.....	31
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.1. Matéria-prima	32

3.2.	Insertos	33
3.3.	Parâmetros de descascamento	35
3.4	Fluido de corte	35
3.5	Análise estatística	36
3.6.	Método de medição de desgaste	37
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1.	Resultados dos testes de descascamento.....	39
4.1.1.	Desgaste após a usinagem de 1000 metros de barra.....	39
4.1.2.	Desgaste após a usinagem de 2000 metros de barra.....	43
4.2.	Influência do fluido de corte.....	47
4.3.	Influência do revestimento	49
4.4.	Interação entre as variáveis.....	52
5.	CONCLUSÕES	55
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	57
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fluxo de produção de barras descascadas da Aciaria até Expedição (Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2009).....	3
Figura 1.2. Acabamento superficial de barras descascadas e polidas de diversos diâmetros (Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2009).....	5
Figura 2.1. Esquema de um processo de descascamento de barras (Fonte: Sandvik Coromant).	7
Figura 2.2. Vista geral de uma máquina completa de descascamento, com descascadeira à esquerda e politriz à direita.....	8
Figura 2.3. Mapa de processo do descascamento e suas variáveis envolvidas.....	9
Figura 2.4. Rolos de tração durante processamento.....	11
Figura 2.5. (A) Cabecote instalado na máquina. (B) Desenho esquemático, com porta-ferramentas e insertos.	12
Figura 2.6. (A) Guias de saída. (B) Carro de tração.	13
Figura 2.7. Ângulo de corte de acordo com a dureza do material a ser cortado (COSTA, 2006).	14
Figura 2.8. (A) geometria da ferramenta de corte e (B) desenho esquemático em corte.	15
Figura 2.9. Ângulos da ferramenta de corte medidos no plano de referência (adaptado de DINIZ, 2000).....	15
Figura 2.10. Planos do sistema de referência de ferramenta (AMORIM, 2002).	16
Figura 2.11. Ângulos de folga, saída e cunha de ferramenta (AMORIM, 2002).	17
Figura 2.12. Ângulos de saída para uma ferramenta (COSTA, 2006).....	17
Figura 2.13. Seleção de materiais para fabricação de insertos de acordo com sua dureza e resistência a ruptura (Adaptado de Sandvik Coromant, 1994).....	19
Figura 2.14. Materiais utilizados para confecção de insertos (adaptado de MACHADO, 2000).	20

Figura 2.15. Vida útil de acordo com o revestimento empregado (D'ERRICO, 1998).....	21
Figura 2.16. Condutividade térmica de TiC, TiN, TiCN e Al ₂ O ₃ (adaptado de GRZESIK, 2004).	23
Figura 2.17. Durezas de diferentes compostos (KHALID, 2002).	23
Figura 2.18. Vida útil para diversos revestimentos em uma operação de torneamento (RUPPI, 1998).	24
Figura 2.19. Corte transversal em um inserto recoberto com TiN, Al ₂ O ₃ e TiCN (WANIGARATHNE, 2005).....	25
Figura 2.20. Relação entre temperatura e velocidade de corte em uma usinagem seca/úmida (MAEKAWA, 1998).	27
Figura 2.21. Modelo do fluxo de calor durante o corte (HIRAO, 1998).	28
Figura 2.22. Propagação do calor durante o processo de usinagem (UMBRELLO, 2007)....	28
Figura 2.23. Variação da temperatura inicial de corte em relação ao diâmetro da barra (BOUD, 2007).	29
Figura 2.24. Aspecto do cavaco variando-se somente o diâmetro das barra. (a) 31 mm, (b) 53 mm e (c) 75 mm (BOUD, 2007).....	30
Figura 2.25. Efeito da concentração do fluido na vida útil do inserto (ÁVILA, 2001).....	30
Figura 2.26. Efeito da vazão do fluido na vida útil do inserto (DHAR, 2006).....	31
Figura 3.1. Microestrutura do produto laminado, apresentando estrutura perlita + ferrita, obtida através do resfriamento das barras no leito de laminação.	33
Figura 3.2. Desenho esquemático dos insertos utilizados.....	33
Figura 3.3. Inserto VTS (esquerda) e inserto VTA (direita).....	35
Figura 3.4. Representação dos tipos de desgastes (Adaptado de DINIZ, 2000).....	37
Figura 4.1. Interação entre as variáveis para o descascamento de 1000 m de barras.	40
Figura 4.2. Variabilidade dos ensaios realizados com 1000 metros de barra descascada (boxplot).	40
Figura 4.3. Desgaste do teste 1 (VTS, 3%) com 1000 metros de barra processada.....	41
Figura 4.4. Desgaste do teste 2 (VTA, 3%) com 1000 metros de barra processada.....	42
Figura 4.5. Desgaste do teste 3 (VTS, 6%) com 1000 metros de barra processada.....	42
Figura 4.6. Desgaste do teste 4 (VTA, 6%) com 1000 metros de barra processada.....	43
Figura 4.7. Interação entre as variáveis para o descascamento de 2000 m de barras.	44
Figura 4.8. Variabilidade dos ensaios realizados com 2000 metros de barra descascada (boxplot).	44
Figura 4.9. Desgaste do teste 1 (VTS, 3%) com 2000 metros de barra processada.....	45

Figura 4.10. Desgaste do teste 2 (VTA, 3%) com 2000 metros de barra processada.....	46
Figura 4.11. Desgaste do teste 3 (VTS, 6%) com 2000 metros de barra processada.....	46
Figura 4.12. Desgaste do teste 4 (VTA, 6%) com 2000 metros de barra processada.....	47
Figura 4.13. Desgaste para o inserto VTA de acordo com a concentração e quantidade de barra descascada.	48
Figura 4.14. Desgaste para o inserto VTS de acordo com a concentração e quantidade de barra descascada.	48
Figura 4.15. Coloração do cavaco para cada condição testada.....	49
Figura 4.16. Desgaste para a concentração de 3% de acordo com o revestimento e comprimento de barra descascada.	50
Figura 4.17. Desgaste para a concentração de 6% de acordo com o revestimento e comprimento de barra descascada.	50
Figura 4.18. Desgaste em um inserto com revestimento VTA na concentração de 6% após 2000 metros de barra descascada (aumento 20X).	51
Figura 4.19. Desgaste em um inserto com revestimento VTS na concentração de 6% após 2000 metros de barra descascada (aumento 20X).	51
Figura 4.20. Significância do DOE para o descascamento de 1000 m com 90% de confiabilidade.	52
Figura 4.21. Significância do DOE para o descascamento de 2000 m com 90% de confiabilidade.	53
Figura 4.22. Significância do DOE para o descascamento de 1000 m com 39% de confiabilidade.	53
Figura 4.23. Significância do DOE para o descascamento de 2000 m com 82% de confiabilidade.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Comparativo entre as características dos fluidos. 1-ruim, 2-regular, 3-bom, 4-ótimo (WEBSTER, 1995).....	26
Tabela 3.1. Composição química do aço DIN 16MnCr5, percentual em peso.	32
Tabela 3.2. Medidas de cada cota apresentada na Figura 3.2.....	34
Tabela 3.3. Insertos VTA e VTS e sua seqüência de revestimento.....	34
Tabela 3.4. Parâmetros de descascamento utilizados nos testes	35
Tabela 3.5. Concentração de óleo a ser utilizada nos testes de descascamento.	36
Tabela 3.6. Matriz de execução dos testes	36
Tabela 4.1. Desgaste de flanco em μm para cada condição de teste e comprimento total de barras usinadas.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

y	característica do produto final
y'	característica do produto intermediário
C	variável do processo controlada
R	variável do processo não controlada (ruído)
Ra	rugosidade
T_c	temperatura de corte
V_c	velocidade de corte
R	taxa de calor
q	calor
f	avanço por rotação
V_f	velocidade de avanço
Q	taxa de remoção do material
a_p	profundidade de corte
n	rotação
d_0	diâmetro da barra a ser descascada
A_γ	superfície de saída
A_α	superfície de folga principal
A_α'	superfície de folga secundária
S	aresta principal de corte
S'	aresta secundária de corte
χ_r	ângulo de posição da ferramenta
χ_r'	ângulo de posição secundário da ferramenta
ε_r	ângulo de ponta da ferramenta
λ_s	ângulo de inclinação da ferramenta
Pr	plano de referência
Ps	plano de corte
Po	plano ortogonal
Pf	plano de trabalho

γ	ângulo de saída de ferramenta
β	ângulo de cunha de ferramenta
α	ângulo de folga
H_r	dureza relativa
H_t	dureza do inserto
H_p	dureza da peça
T_c	temperatura de corte
MQL	quantidade mínima de lubrificação
DOE	Projeto de experimentos
V_b	desgaste de flanco
KT	profundidade de cratera
DIN	norma padronizada

RESUMO

O tempo gasto na troca de insertos de usinagem e a geração de sucata e inconformidades (marcas de ferramenta, diâmetro fora do especificado, dentre outras) devido ao seu desgaste precoce são motivos de constante preocupação em empresas que buscam minimizar as perdas em seus processos. Por este motivo, o presente trabalho tem por objetivo realizar uma avaliação da influência de duas variáveis no desgaste de insertos utilizados para o descascamento de barras de aços especiais: tipo de revestimento do inserto e concentração do fluido de corte. O descascamento é um método de usinagem que visa à remoção de defeitos superficiais de barras laminadas a quente e a obtenção de uma superfície com boa tolerância dimensional de diâmetro e baixos níveis de ovalização.

Inicialmente, foi realizada uma revisão dos principais conceitos e fundamentos de usinagem, bem como a influência de cada uma das variáveis no desgaste de ferramentas de corte. Também foi descrito brevemente como é realizado o processo de descascamento, uma vez que a bibliografia para este tipo de usinagem é bastante escassa.

Através da ferramenta estatística *Design of Experiments* (DOE), foram planejados testes com parâmetros de processo fixos de usinagem, tais como velocidade de corte, avanço, rotação e profundidade de corte, e variou-se a concentração do fluido de corte (concentrações de 3 e 6%) e o revestimento do inserto (multi-camadas de TiN, TiC, Al₂O₃ e TiN e multi-camadas de TiN, TiCN, TiC e Al₂O₃). O DOE 2² foi realizado com comprimento total de barra usinada de 1000 e 2000 metros para cada uma das quatro condições. Analisou-se o desgaste para a variação de concentração de fluido de corte e revestimento do inserto separadamente e a interação das duas variáveis.

Os resultados obtidos permitem melhorar o conhecimento sobre a influência destas duas variáveis no desgaste de insertos durante o descascamento com o objetivo de minimizar perdas decorrentes ao fim da vida útil de ferramentas de corte.

ABSTRACT

Time spent on machining inserts change and the scrap generation and unconformities (tool marks, diameter out of specification among others) due to their premature wear, are reasons of constant concern for companies that look for lost minimization on their processes. Therefore, the present work aims at evaluating the influence of two variables on inserts wear used for peeling of hot rolled special steel bars: coated inserts and coolant concentration. Peeling process its a machining processes used for removing surface defects of hot rolled bars, obtaining a surface with good diameter tolerance and low out-of-roundness.

Initially, a literature review of the main concepts and fundamentals of machining was made, as well as the influence of each of the variables on the inserts wear. Also, the peeling process was briefly described, as literature about this subject is considerably rare.

Through the statistical tool Design of Experiments (DOE), tests were made with locked process parameters such as cutting speed, feed, rotation, depth of cut and changing coolant concentration (concentration of 3 and 6%) and inserts coating (multi-layers of TiN, TiC Al₂O₃ and multi-layers of TiN, TiCN, TiC and Al₂O₃). The DOE was done for cutting lengths of 1000 and 2000 meters for each of the four condition. The wear for variation of fluid coolant concentration and insert coating was analyzed separately as well as considering the interaction of both variables.

The obtained results allowed to improved the knowledge of the influence of the two variables on inserts wear during the peeling process in order to minimize lost due to end of useful life of inserts.

1. INTRODUÇÃO

Os conceitos de Qualidade Total, Programação da Produção e Tecnologias de Processos são atualmente empregados em empresas dos mais diversos setores para obter-se competitividade dentro de um mercado cada vez mais agressivo. A partir dos êxitos alcançados pelos países asiáticos durante a década de 70, principalmente no Japão, estes conceitos tornaram-se requisitos mínimos para a sobrevivência de uma empresa frente à concorrência.

Um dos sistemas de qualidade mais difundidos é o Sistema Toyota de Produção. Largamente utilizado em praticamente todos os países, sejam eles de Primeiro ou Terceiro Mundo, tem como condição básica e primordial a busca incessante da eliminação de desperdícios dentro do processo produtivo (OHNO, 1988). Duas fontes de desperdício que são facilmente identificadas dentro do processo e que quando reduzidas ou eliminadas trazem resultados significativos são o tempo de troca de ferramental de uma máquina e a diminuição da quantidade percentual de produtos fabricados com qualidade inferior ao requisitado pelo cliente, gerando sucateamento. Essas fontes de desperdício estão de acordo com o Sistema Toyota, cuja filosofia visa eliminar tempos “mortos” para aumentar o tempo de produção de uma máquina (CHANDRASHEKAR, 1998).

Este trabalho foi proposto tomando como base a filosofia Toyota. Durante a produção de barras descascadas de aço especial, toda vez que um inserto chega prematuramente ao fim de sua vida útil ocorre uma demanda de tempo significativa para sua troca, ocasionando a perda de tempo de utilização da máquina para produção. Além disso, insertos desgastados provocam problemas de variação de diâmetro da barra em processo e marcas superficiais indesejáveis, ocasionando o sucateamento do produto.

Como fator agravante, cada inserto tem um custo médio de US\$ 25,00. Para realizar-se o descascamento de barras, a maioria das máquinas em operação utiliza quatro insertos em

sua configuração básica, consumindo dessa forma uma quantidade significativa de ferramentas de corte durante a produção de barras descascadas. Empresas com um processo no estado da arte processam em média 12 ton por inserto.

Dessa forma, a proposta deste trabalho é verificar quais os parâmetros de processo que impactam de forma mais significativa no desgaste dos insertos de corte utilizados, minimizando tempo de troca de ferramenta, sucateamento e custo de processo. Sobre muitas das variáveis já se tem informações da forma que a mesma impacta sobre a vida do inserto, mas não se tem estudos quantificando qual variável é mais importante.

Este trabalho foi realizado na Gerdau Aços Especiais – Unidade Charqueadas, usina focada na produção de aços longos especiais voltados principalmente para atender a indústria automotiva. Possui capacidade instalada de 500 mil toneladas por ano.

Na linha de produção mais empregada nessa usina, o material processado é produzido através da laminação a quente de barras originadas de tarugos solidificados via lingotamento contínuo. A Figura 1.1 mostra a seqüência de produção de barras descascadas nesta unidade.

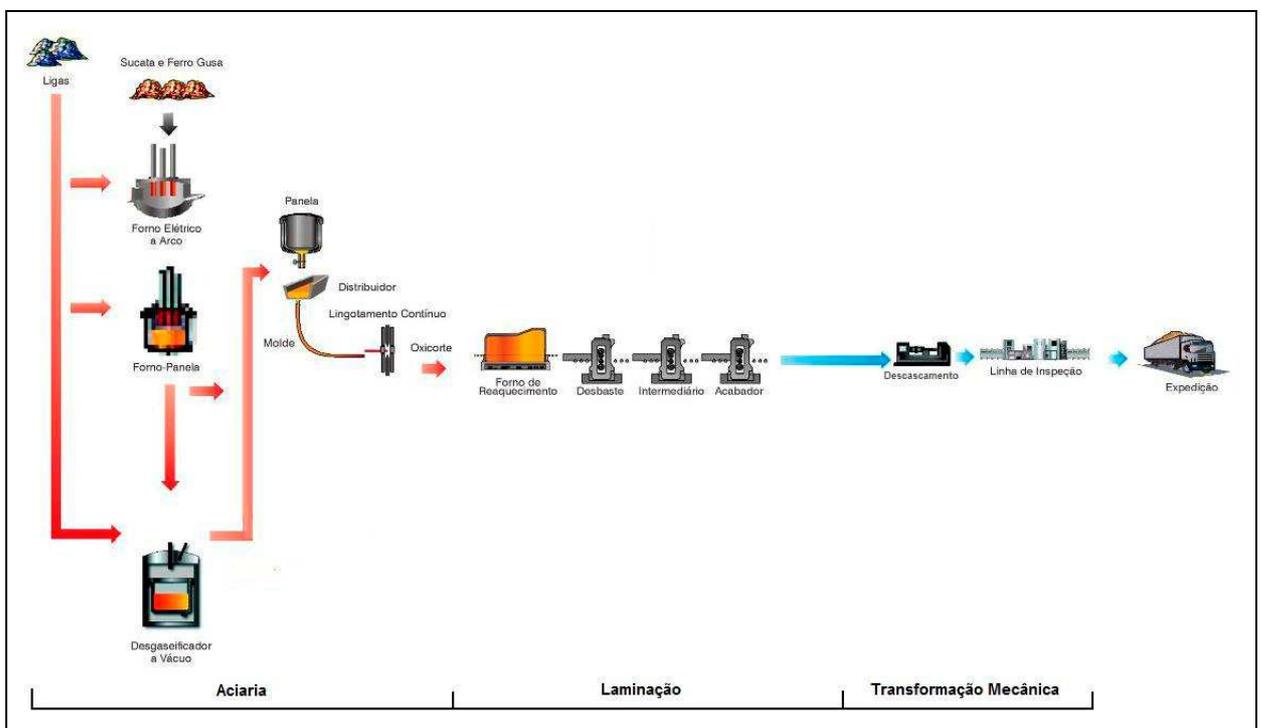


Figura 1.1. Fluxo de produção de barras descascadas da Aciaria até Expedição (Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2009).

O processamento do aço consiste na fusão de sucata, ferro-gusa e ferro-ligas em um forno de fusão a arco elétrico. Após a fusão, ocorre o refino primário neste mesmo equipamento. Em seguida, é realizado o refino secundário e desgaseificação no aço em uma estação de forno-panela e desgaseificador a vácuo, onde são adicionados elementos de liga, desoxidantes e eliminado o excesso de gases, principalmente hidrogênio. Enfim, o aço é solidificado através de velocidades e temperaturas controladas a fim de se obter uma taxa de resfriamento adequada em uma máquina de lingotamento contínuo em seções quadradas de 155 ou 240 mm. Após endireitamento e corte a quente, está finalizado o processamento do tarugo.

Na laminação, após um reaquecimento em temperatura adequada, o tarugo é conformado a quente através da passagem por diversos canais e rolos de laminação, obtendo-se dessa forma uma barra com a seção redonda desejada.

Na área da usina denominada Transformação Mecânica, o processo de descascamento permite o acabamento a frio de barras laminadas com ótima produtividade e bom acabamento superficial. Um posterior polimento e endireitamento de precisão é realizado através da passagem da barra por um conjunto de dois rolos hiperbólicos, cerca de 95% do material processado via descascadeira nesta usina é polido posteriormente.

O descascamento de barras confere ao produto isenção de defeitos superficiais do tipo trincas, escamas, dobras, etc. e também uma tolerância dimensional a partir de ISO h9, tornando esse produto bastante atrativo por eliminar etapas sucessivas de usinagem posteriores. Comparado ao torneamento convencional, o descascamento é um método de usinagem que proporciona alta produtividade e baixos custos de produção devido à alta velocidade de avanço empregada. Na Figura 1.2 pode-se verificar o acabamento superficial de barras descascadas e polidas. Estas barras apresentam excelente retilineidade com um desvio de no máximo 2 mm/m e rugosidade superficial média Ra de 0,7 mm.

Este trabalho abordará especificamente o desgaste de insertos utilizados no descascamento através da variação de duas variáveis de processo, buscando verificar suas influências e interação.



Figura 1.2. Acabamento superficial de barras descascadas e polidas de diversos diâmetros
(Fonte: site Gerdau Aços Especiais, 2009)

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de usinagem

Usinagem é um termo que cobre diversos processos de remoção de material de uma peça, usualmente na forma de cavacos. É normalmente utilizada para dar à peça a forma final de acordo com um projeto específico (METALS HANDBOOK, 1993). Dentre os inúmeros processos de usinagem, podemos citar o torneamento, descascamento, fresamento, retífica, brochamento, furação, dentre outros.

Dentro destes processos, algumas variáveis atuam de forma mais significativa, devendo ser controladas de maneira mais cuidadosa para evitar problemas indesejáveis. Dentre as variáveis, podemos citar algumas, como material a ser usinado, geometria inicial da peça, material e revestimento do inserto, tipo e concentração do fluido de corte e parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte).

2.1.1 Processo de descascamento de barras laminadas

Descascamento é um processo especial de usinagem e, devido a isto, a literatura não apresenta muitos estudos e artigos publicados sobre o assunto. Dessa forma, é importante descrever o processo e suas particularidades, incluindo suas principais variáveis e aspectos importantes.

Dentre os processos de usinagem mais utilizados, o de torneamento é o que mais se assemelha ao descascamento. No torneamento mais comum, se geram formas assimétricas (superfícies de revolução) com uma ferramenta de corte usinando com uma única aresta e, na maioria dos casos, a ferramenta faz um movimento de translação e a peça um movimento de rotação. Em muitos aspectos é o método de corte de metal onde a ferramenta avança em um

sentido. Já no descascamento, as ferramentas giram, mantendo-se perpendiculares a superfície da barra, enquanto ocorre o avanço longitudinal da barra. A Figura 2.1 apresenta um esquema do descascamento de barras.

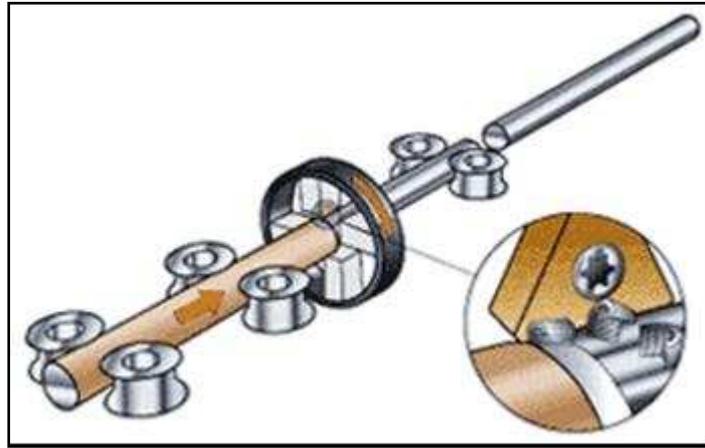


Figura 2.1. Esquema de um processo de descascamento de barras (Fonte: Sandvik Coromant).

Entre os parâmetros de corte presentes no descascamento, podemos destacar a velocidade de corte (V_c) que é a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa pela aresta de corte do inserto, o avanço por rotação (f), que é a distância percorrida pela barra por revolução das ferramentas, a profundidade de corte (a_p), que é a espessura de penetração do inserto e a velocidade de avanço, ou simplesmente avanço (V_f), que é a velocidade com que a barra é alimentada no processo, além da rotação dos inserts (n). A partir destes parâmetros é possível determinar a taxa de remoção do material (Q), que nos dá uma idéia da eficiência do processo (equação 1).

$$Q = V_c * a_p * f \quad (1)$$

Além da taxa de remoção, as equações 2 a 4 demonstram a fórmula de cálculo dos parâmetros, onde d_0 é igual ao diâmetro da barra a ser descascada:

$$n = (V_c * 1000) / (d_0 * \pi) \quad (2)$$

$$V_c = (d_0 * \pi * n) / 1000 \quad (3)$$

$$f = V_f / n \quad (4)$$

O processo de descascamento de barras é utilizado principalmente em usinas produtoras de aços longos especiais e tubos. As barras descascadas são utilizadas principalmente para a confecção de eixos e engrenagens, particularmente devido à isenção de defeitos superficiais e tolerância dimensional apropriada (DEAN, 2000).

Como matéria-prima, utiliza-se barras redondas provenientes do processo de laminação a quente. Normalmente as máquinas de descascamento, denominadas descascadeiras, têm como faixa de trabalho bitolas entre 11,00 e 130,00 mm de diâmetro. Estas máquinas são constituídas basicamente de um conjunto de rolos de tração, guias de entrada, cabeçote com porta-insertos, guias de saída e carro de extração. Um perfeito alinhamento entre todas estas partes é de fundamental importância para um processo estável e um descascamento uniforme da barra. A Figura 2.2 apresenta uma vista geral de uma descascadeira.



Figura 2.2. Vista geral de uma máquina completa de descascamento, com descascadeira à esquerda e politriz à direita.

As variáveis envolvidas no processo de descascamento estão apresentadas na Figura 2.3 através da ferramenta denominada Mapa de Processo (DEMING, 1982). Esta ferramenta caracteriza-se por apresentar o fluxo do processo com suas variáveis, ruídos e produtos. O

objetivo do desenvolvimento deste Mapa de Processo do Descascamento foi o de listar todas as variáveis importantes que eventualmente podem alterar o resultado do processo. Seu conhecimento auxiliou no Design de Experimentos para o desenvolvimento da parte prática desta dissertação.

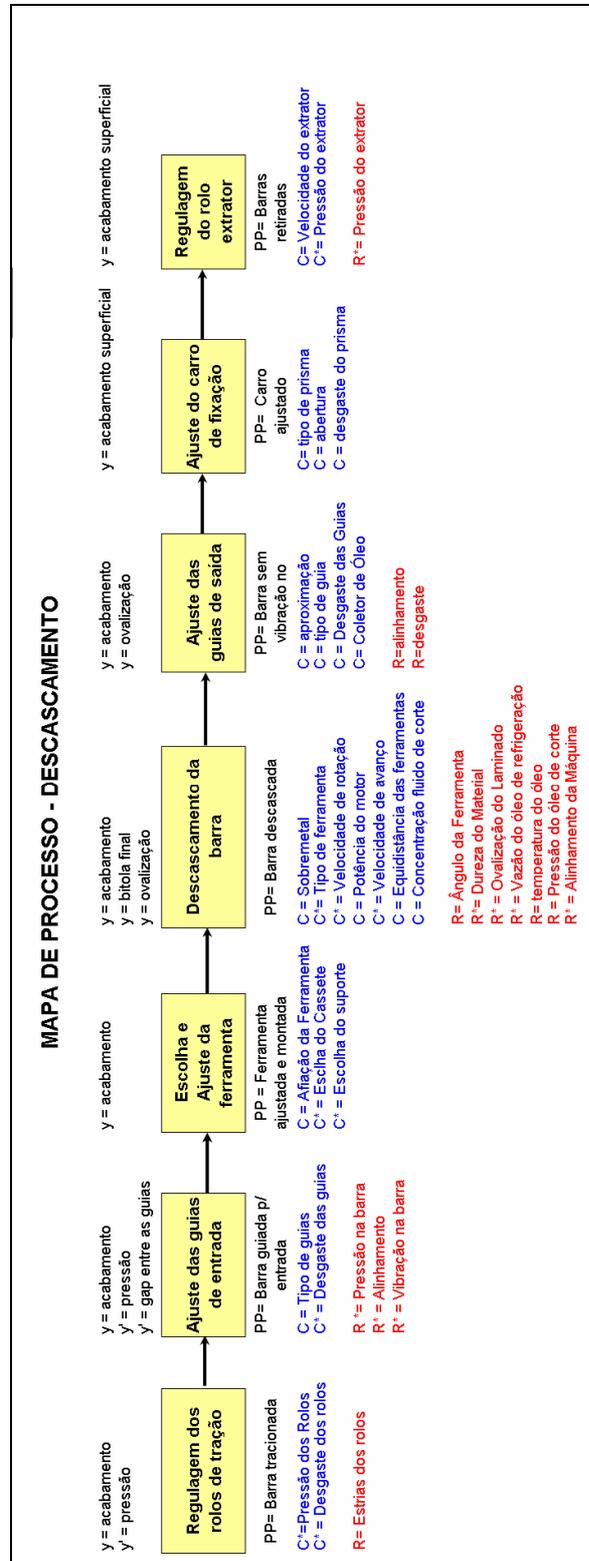


Figura 2.3. Mapa de processo do descascamento e suas variáveis envolvidas.

Na Figura 2.3, as variáveis identificadas com a letra *C* podem ser controladas durante o processo através de ajustes no equipamento. As variáveis identificadas com a letra *R* são ruídos do processo e não podem ser controladas nesta etapa. Os itens identificados com asterisco são considerados críticos. Acima de cada caixa estão listadas as características resultantes. As identificadas com a letra *y* são características finais do produto, não sendo modificadas nas etapas seguintes, mas são influenciadas pelas outras variáveis do processo, tanto as controláveis como não diretamente controláveis. As características identificadas da forma *y'* podem ser modificadas durante o processo.

2.1.1.1. Rolos de tração e guias de entrada

Os elementos mecânicos responsáveis pela fixação da barra no início do processo e determinantes na sua velocidade são os rolos de tração. Normalmente compostos por dois jogos de rolos dispostos em seqüência, são eles que firmam a barra durante a maior parte do processo. Pressões de até 80 psi são utilizadas para garantir que a barra não gire durante seu descascamento. Além disso, os rolos possuem recartilhados em sua superfície, garantindo uma maior aderência. Porém, caso sejam utilizadas pressões elevadas em uma barra descascada com uma espessura pequena de sobremetal, as marcas dos rolos poderão não ser eliminadas durante o descascamento.

Após a passagem pelos rolos, a barra é guiada para o cabeçote através das guias de entrada. Um ajuste correto das guias é importante, já que é necessário que as mesmas guiem a barra para exatamente o meio do cabeçote. Eventuais desalinhamentos comprometerão a qualidade final do produto, uma vez que a barra será usinada de maneira desuniforme. A Figura 2.4 apresenta os rolos de tração e as guias de entrada.

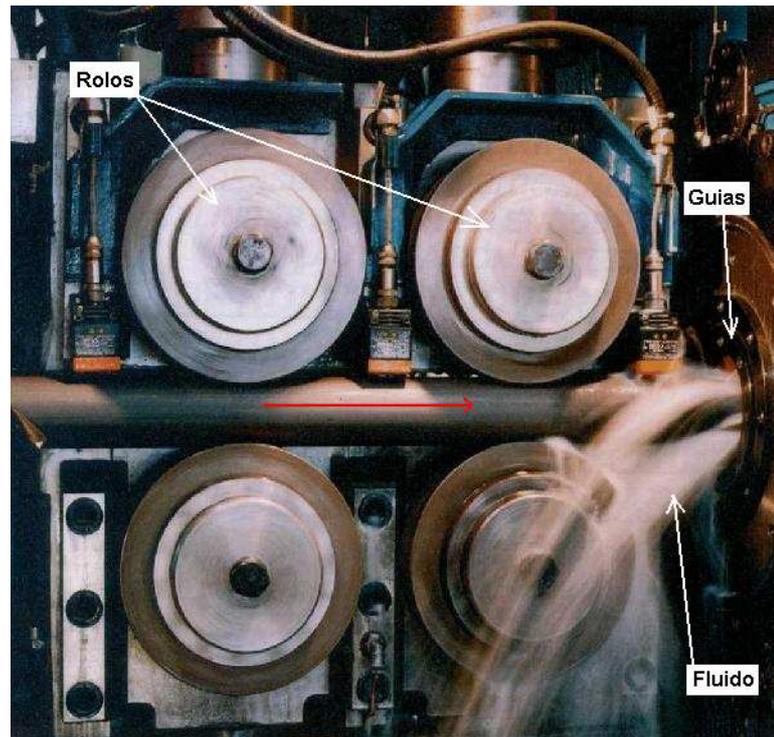


Figura 2.4. Rolos de tração durante processamento.

2.1.1.2. Cabeçote de descascamento

O cabeçote de descascamento é a principal parte da descascadeira. Nele estão dispostos os quatro porta-ferramentas que têm a função de fixar os insertos. Em operação, o cabeçote pode atingir rotações de até 1700 rpm, de acordo com a configuração do motor da máquina. Estas elevadas rotações são mais utilizadas quando a velocidade de avanço da barra atinge valores por volta de 24 m/min.

Como comentado previamente, é de fundamental importância para a qualidade do processo o alinhamento da barra no meio do cabeçote, evitando um descascamento desuniforme da barra.

Os quatro insertos estão dispostos no cabeçote a 90° uns dos outros, disposição que proporciona uma maior área de contato inserto-barra, garantindo um descascamento de toda a superfície. Os insertos são fixados por parafusos e assentados por um calço. A Figura 2.5 apresenta um cabeçote com ferramentas instalado na máquina e um desenho esquemático.

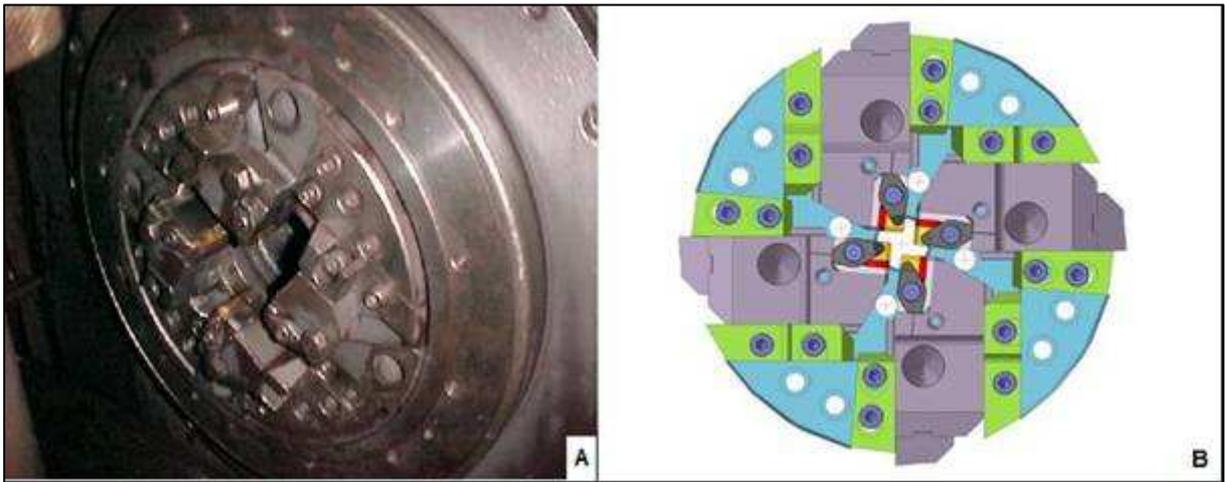


Figura 2.5. (A) Cabecote instalado na máquina. (B) Desenho esquemático, com porta-ferramentas e inserts.

O cabecote e seus inserts são constantemente lubrificados e refrigerados por um fluido de corte.

2.1.1.3. Guias de saída e carro de tração

As guias de saída, da mesma forma que as guias de entrada, têm com principal função garantir o perfeito alinhamento da barra durante o processo, evitando flexões que poderiam causar variações na bitola da barra e até mesmo uma quebra do inserto. Como esta guia está disposta após o descascamento do material, ela deve ser regulada de acordo com a nova bitola.

Após a passagem de toda a barra pelos rolos de tração, a barra não possui mais nenhum elemento que faça a mesma manter uma velocidade constante de alimentação para a finalização do processo. Dessa forma, o carro de tração, situado após as guias de saída, atua de forma a extrair a barra fazendo com que a parte final seja também processada de forma efetiva. As guias de saída e o carro de tração podem ser visualizados na Figura 2.6.

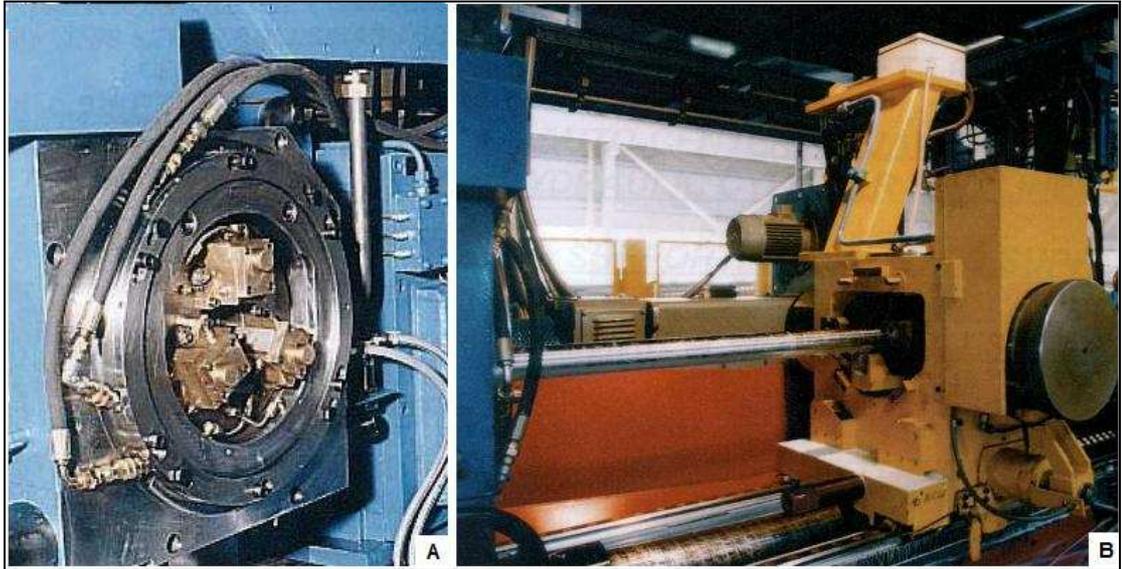


Figura 2.6. (A) Guias de saída. (B) Carro de tração.

2.2 Insertos / Ferramentas de corte

A grande evolução alcançada pelas indústrias, necessária para uma maior competitividade verificada pela diminuição de custos, não deixou o desenvolvimento de insertos para trás. No início da produção das ferramentas de corte, estas apenas eram composta de um material base. A utilização de insertos revestidos na usinagem de metais hoje representa o estado-da-arte. Além disso, uma infinidade de geometrias de pastilhas e meios de fixação são fabricados, podendo-se aplicar a melhor forma de acordo com o processamento a ser realizado.

2.2.1 Geometrias

A geometria da ferramenta, juntamente com outros fatores, é um dos pontos que devem ser analisados durante o processo de usinagem. É necessário definir uma cunha de corte (ângulo e raio de ponta) apropriada para cortar o material de acordo com sua dureza (COSTA, 2006). A Figura 2.7 exemplifica o grau de cada cunha de corte de acordo com o material a ser cortado.

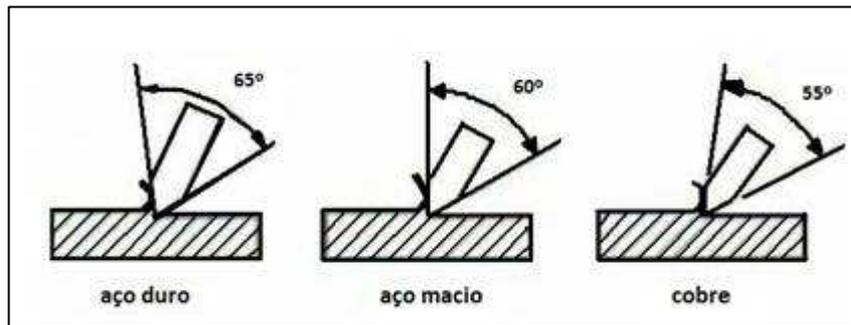


Figura 2.7. Ângulo de corte de acordo com a dureza do material a ser cortado (COSTA, 2006).

Podemos definir a geometria da ferramenta de corte da seguinte forma, de acordo com a Figura 2.8:

- Cunha de corte: é a cunha formada pelas superfícies de saída e de folga da ferramenta. Através do movimento relativo entre a peça e a ferramenta formam-se cavacos sobre a cunha de corte;
- Superfície de saída (A_{ψ}): é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco desliza;
- Superfície de folga (A_{α}): é a superfície da cunha de corte que determina a folga entre a ferramenta e a superfície de usinagem da peça. Distinguem-se a superfície principal de folga A_{α} e a secundária A_{α}' ;
- Aresta de corte (S): são as arestas da cunha de corte formadas pelas superfícies de saída e de folga. Distinguem-se a aresta principal de corte S e a aresta secundária S' ;
- Ponta de corte: parte da cunha de corte onde se encontram a aresta principal e a aresta secundária de corte;
- Ponto de corte escolhido: ponto destinado à determinação dos planos e ângulos da cunha de corte, ou seja, as posições se referem a um ponto da ferramenta, dito ponto de corte escolhido ou “ponto de referência”.

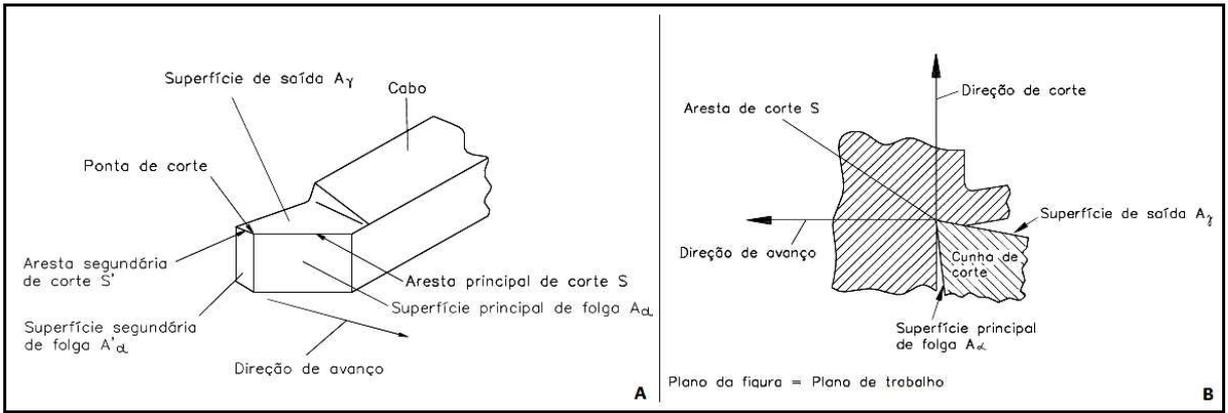


Figura 2.8. (A) geometria da ferramenta de corte e (B) desenho esquemático em corte.

Os ângulos referentes à ferramenta e a posição desta em relação à peça (Figura 2.9) são medidos em diferentes planos de referência de acordo com a Figura 2.10, com diferentes representações para cada operação de usinagem. Para a operação de descascamento, os ângulos mais influentes são o ângulo de posição da ferramenta (χ_r), o ângulo de posição secundário da ferramenta (χ_r') e o ângulo de ponta da ferramenta (ϵ_r), medidos no plano de referência (P_r), o ângulo de inclinação da ferramenta (λ_s) no plano de corte (P_s) e o ângulo de folga (α) medidos no plano ortogonal (P_o).

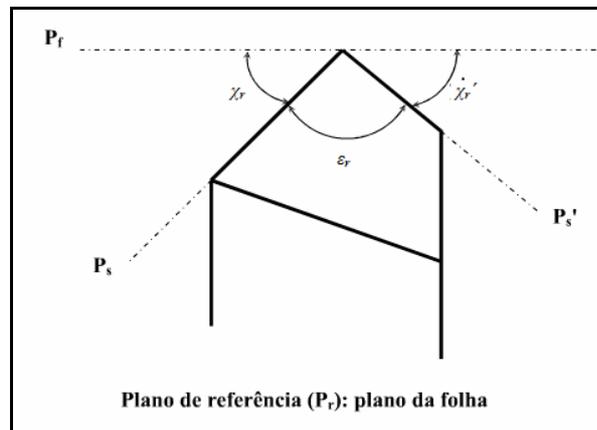


Figura 2.9. Ângulos da ferramenta de corte medidos no plano de referência (adaptado de DINIZ, 2000).

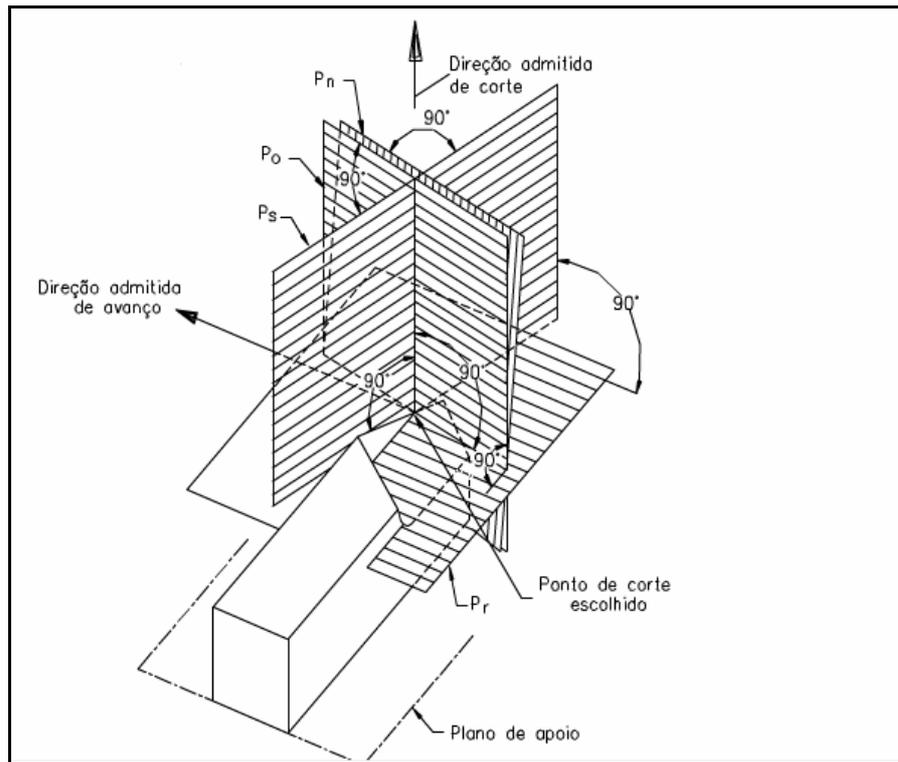


Figura 2.10. Planos do sistema de referência de ferramenta (AMORIM, 2002).

Outros ângulos importantes a serem determinados são (Figura 2.11):

- Ângulo de saída (γ): ângulo entre a superfície de saída e o plano de referência da ferramenta.
- Ângulo de cunha de ferramenta (β): ângulo entre a superfície de saída e a de folga.
- Ângulo de folga (α): ângulo entre a superfície de folga e o plano de corte.

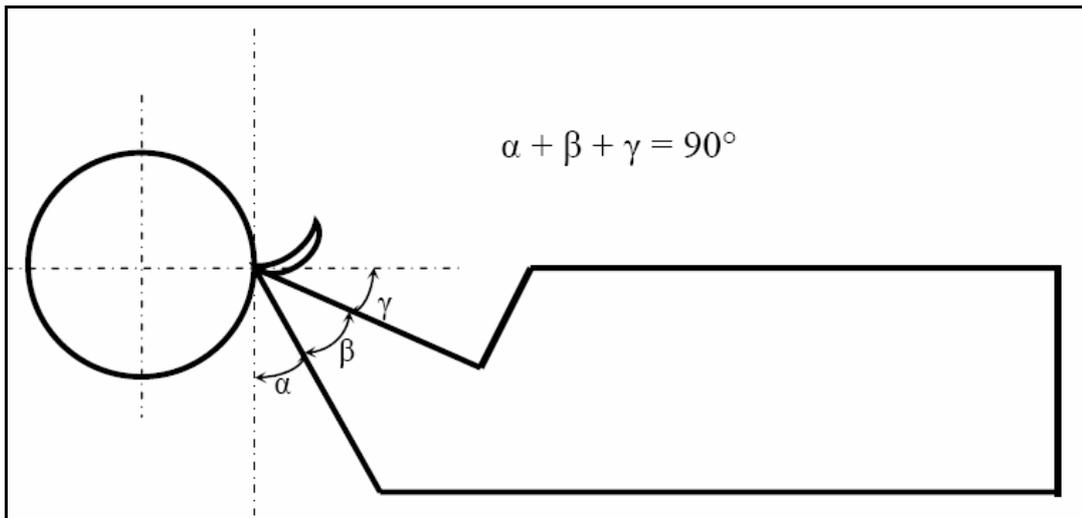


Figura 2.11. Ângulos de folga, saída e cunha de ferramenta (AMORIM, 2002).

Dentre estes ângulos, é importante descrever com maior clareza o ângulo de saída (γ). Ele influi na força e potência necessária ao corte, no acabamento superficial e calor gerado e quanto maior for o ângulo γ , menor será o trabalho de dobramento do cavaco. Conforme a Figura 2.12, o ângulo de saída pode variar de positivo a negativo. O ângulo γ deve ser maior para materiais que oferecem pouca resistência ao corte e menor para materiais duros ou com muitas irregularidades (COSTA, 2006).

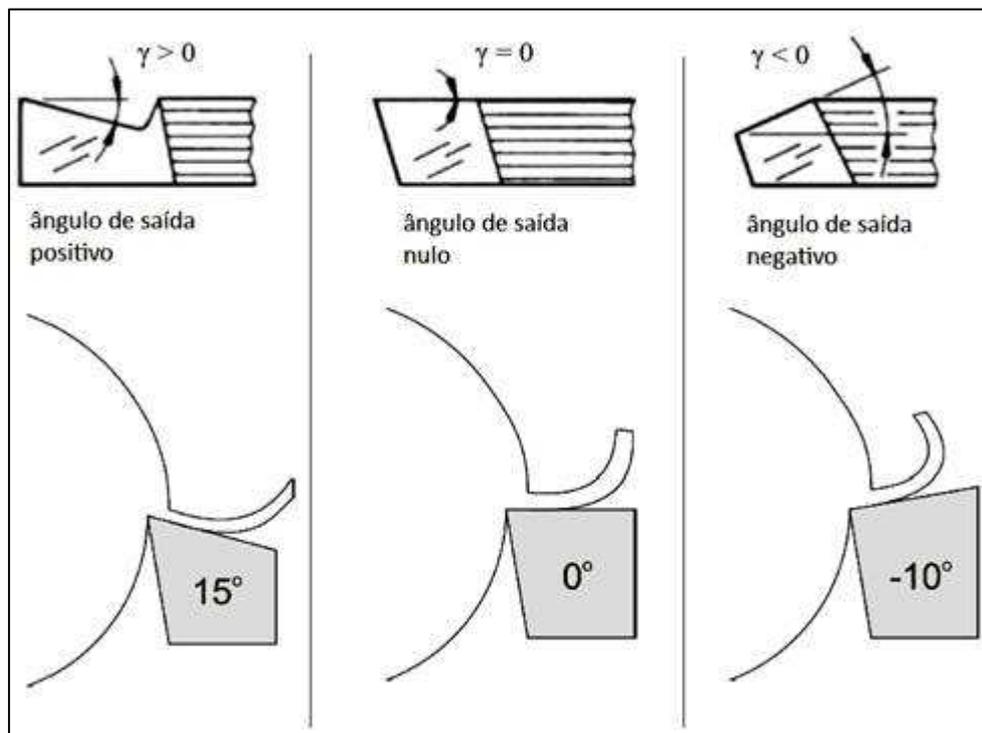


Figura 2.12. Ângulos de saída para uma ferramenta (COSTA, 2006).

2.2.2. Materiais para substrato

A possibilidade de realizar uma operação de corte em um material só é possível quando a ferramenta possui uma dureza mais elevada do que a peça. Podemos denominar essa propriedade como dureza relativa (H_r) (equação 5), onde H_t a dureza do inserto e H_p a dureza do material da peça (AMORIM, 2002). Atualmente, com a fabricação de peças com ligas com propriedades mecânicas cada vez maiores, é necessário que as ferramentas apresentem propriedades apropriadas para os cortes destas ligas.

$$H_r = H_t / H_p \quad (5)$$

Da mesma forma que a dureza mostra-se importante, a tenacidade do material também apresenta papel fundamental durante a seleção de materiais para confecção de insertos. Atualmente, conseguem-se boas combinações de dureza e tenacidade em diversos materiais, tanto revestidos como não revestidos. A aplicação de revestimentos busca o equilíbrio entre as propriedades através da aplicação de um material base com boa tenacidade e alguma dureza e um revestimento com alta dureza e resistência a abrasão (AMORIM, 2002).

A Figura 2.13 apresenta uma proposta de seleção de materiais de acordo com sua dureza e resistência à ruptura.

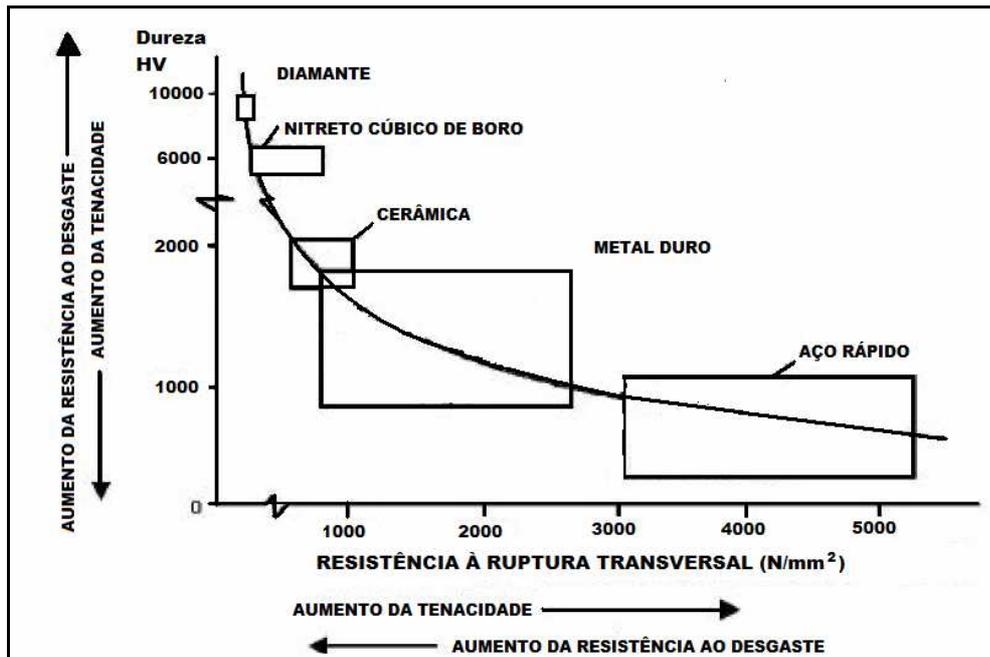


Figura 2.13. Seleção de materiais para fabricação de insertos de acordo com sua dureza e resistência a ruptura (Adaptado de Sandvik Coromant, 1994)

O material selecionado para a confecção de um inserto deve possuir as seguintes propriedades listadas abaixo (AMORIM, 2002). Estas propriedades não estão em ordem de importância, pois as mesmas podem variar de acordo com o tipo de usinagem que está sendo realizada.

- Dureza;
- Tenacidade;
- Resistência ao desgaste;
- Resistência à compressão;
- Resistência ao cisalhamento;
- Propriedades mecânicas a altas temperaturas;
- Resistência ao choque térmico;
- Inércia química.

Atualmente, existem diversos tipos de ferramentas produzidos com os mais variados materiais e revestimentos. A Figura 2.14 os apresenta em ordem decrescente de tenacidade e crescente de dureza.

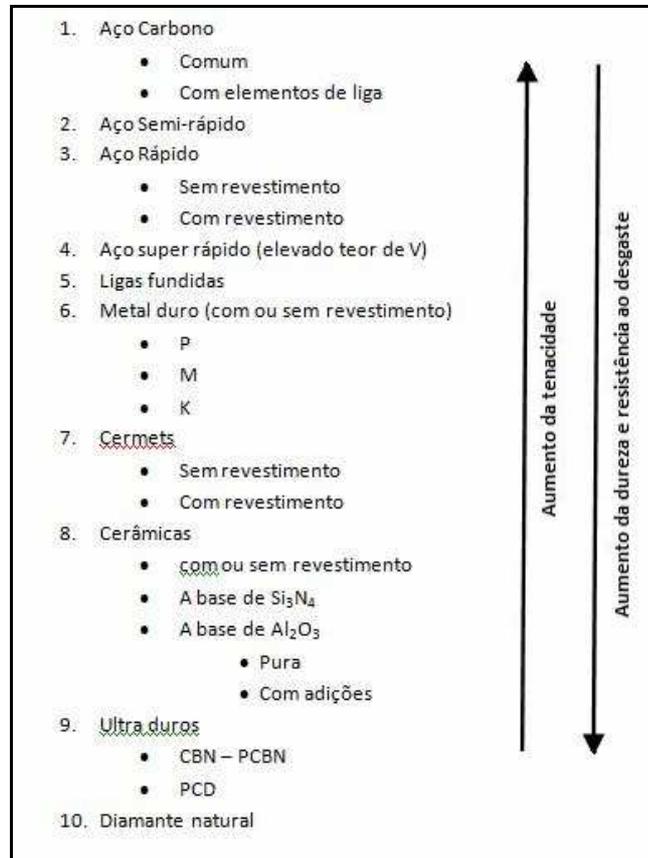


Figura 2.14. Materiais utilizados para confecção de insertos (adaptado de MACHADO, 2000).

Dentre os materiais apresentados, os que mais se destacam são o metal duro e o aço rápido. O metal duro, do ponto de vista técnico, é um dos materiais compósitos de maior sucesso. Este sucesso está diretamente relacionado ao seu método de fabricação, onde carbonetos frágeis de metais de transição tais como WC, TiC, TaC, Cr_3C_2 ou Mo_2C são combinados com um metal aglutinante, na maioria dos casos, cobalto e algumas vezes níquel. Nestas combinações, as positivas propriedades dos componentes são impostas, sendo que o principal componente, o carboneto, proporciona dureza e resistência ao desgaste, enquanto o elemento aglutinante contribui com a tenacidade necessária para a maioria das aplicações (SZUTKOWSKA, 1999).

2.2.3. Revestimentos

Desenvolvimentos nos equipamentos de revestimentos e nos processos hoje permitem uma imensa gama de revestimentos possíveis, como nitretos duros, carbetos, carbonitretos e filmes de óxido, dentre outros (SOKOVIC, 2009). Estes revestimentos têm como função principal aumentar a vida útil do inserto, minimizando o desgaste devido a diversas características, dentre elas a de isolante térmico (BRITO, 2009). A diminuição da temperatura durante o corte e conseqüente menor desgaste são freqüentemente estudados em insertos sem revestimentos. Marusich et al. realizou estudo utilizando a metodologia dos elementos finitos (FEM) comparando a temperatura no substrato para uma condição única de usinagem em insertos com e sem revestimento. O resultado apresentou uma diminuição na ordem de 100 °C no substrato para o inserto revestido (MARUSICH, 2002).

A Figura 2.15 mostra a vida útil de uma ferramenta durante operação de torneamento com diferentes tipos de revestimentos. O inserto não revestido possui a menor vida útil para esta condição de usinagem (D'ERRICO, 1998).

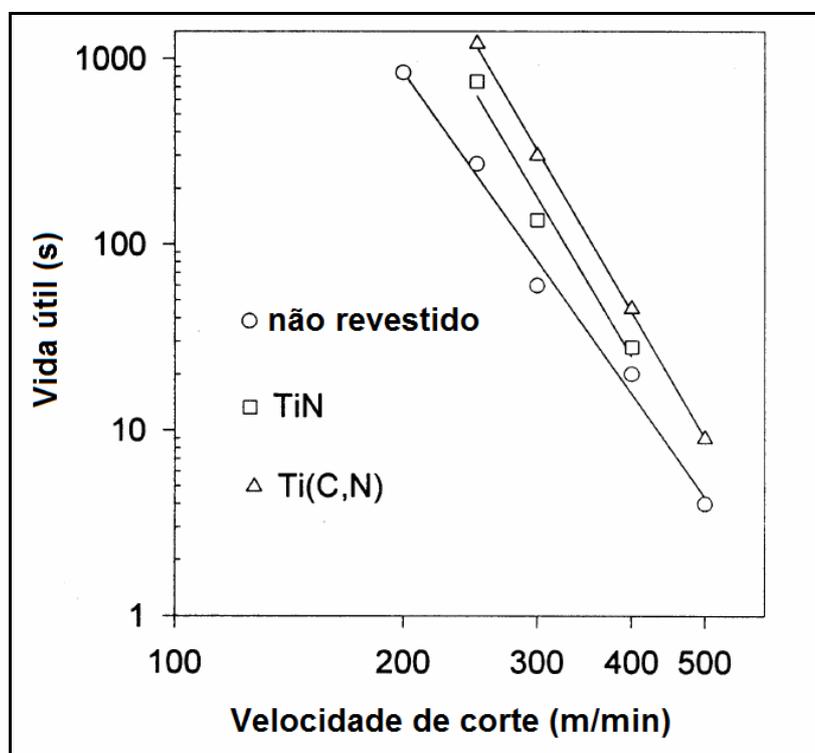


Figura 2.15. Vida útil de acordo com o revestimento empregado (D'ERRICO, 1998).

Basicamente existem dois processos para deposição de revestimentos em insertos:

- PVD: *physical vapor deposition* (deposição física a vapor);
- CVD: *chemical vapor deposition* (deposição química a vapor).

Cada um dos processos pode ser realizado por diferentes métodos e inúmeras companhias estão lançando peças de metal duro revestidas via PVD e CVD (SZUTKOWSKA, 1999).

Usualmente, são aplicados em insertos de metal duro revestimentos de TiC, TiN, TiCN e Al₂O₃. Cada revestimento possui propriedades e características específicas conforme abaixo:

- TiC: O carboneto de titânio é geralmente a primeira (ou única) camada de revestimento, por possuir alta afinidade com o metal duro, o que lhe garante uma boa adesão ao núcleo da ferramenta. Possui elevada dureza (3000 HV, a maior entre os materiais utilizados como cobertura), alta resistência ao desgaste por abrasão e baixa tendência de soldagem com o material da peça. Devido ao fato de conter carbono, necessita de uma barreira térmica para evitar a difusão na usinagem de aços
- TiN: O nitreto de titânio pertence à família dos nitretos refratários de metais de transição e exibe propriedades tanto de compostos covalentes como metálicos. Apresenta excelente adesão, o que o torna adequado para aplicações em microeletrônica. A importância do TiN reside, sobretudo, em sua alta dureza, aliada à resistência ao desgaste e à corrosão, permitindo seu uso na produção de revestimentos e ferramentas de corte (PURUSHOTHAM, 2003).
- TiCN: O carbonitreto de titânio pode ser depositado como multicamadas, com diferentes relações entre carbono e nitrogênio, o que aumenta a tenacidade à fratura (MATTOX, 1995). Em relação ao nitreto de titânio, testes de nanoindentação mostraram que camadas de TiCN apresentam dureza mais elevada, o que pode aumentar a resistência à fadiga e ao desgaste (FANG, 2004). Possui propriedades semelhantes ao TiC, com exceção de seu menor coeficiente de atrito.
- Al₂O₃: A alumina é um dos materiais de maior estabilidade química encontrado na natureza. Devido a esse motivo, é usado como cobertura para garantir a estabilidade química do núcleo da ferramenta e evitar o desgaste causado pela

difusão de átomos do material da peça para a ferramenta e vice-versa. Possui elevada dureza, porém apresenta baixa resistência a choques térmicos e mecânicos.

A Figura 2.16 apresenta a condutividade térmica dos componentes listados, e a Figura 2.17 a dureza de alguns componentes utilizados para revestimentos.

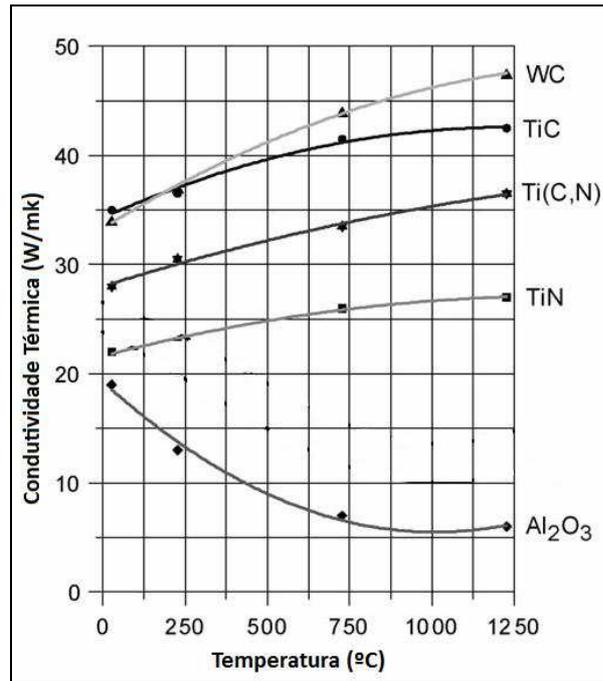


Figura 2.16. Condutividade térmica de TiC, TiN, TiCN e Al₂O₃ (adaptado de GRZESIK, 2004).

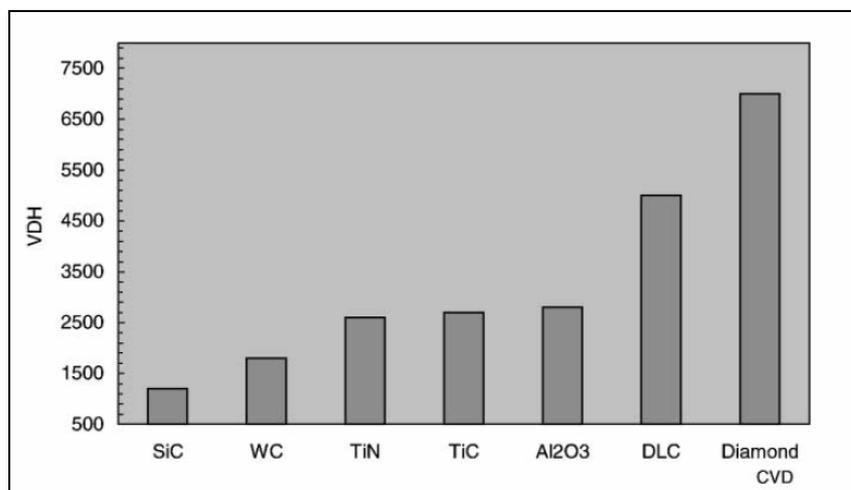


Figura 2.17. Durezas de diferentes compostos (KHALID, 2002).

A Figura 2.18 apresenta a vida útil de diversos inserts revestidos com diferentes compostos para uma operação de torneamento. O revestimento de Al_2O_3 apresenta o maior desgaste devido ao seu descolamento principalmente na região de flanco (RUPPI, 1998).

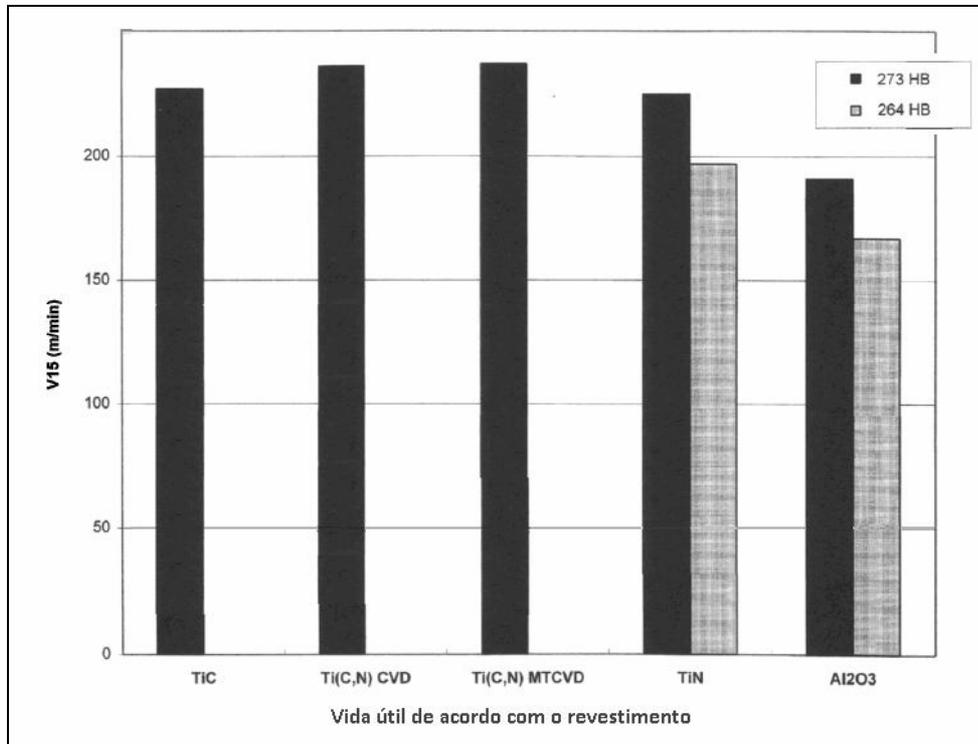


Figura 2.18. Vida útil para diversos revestimentos em uma operação de torneamento (RUPPI, 1998).

Múltiplas camadas de revestimentos obtidas pelo método CVD são recomendados para inserts utilizados para corte contínuo (SZUTKOWSKA, 1999). A aplicação de múltiplos revestimentos em um mesmo inserto tem por objetivo maximizar seu rendimento utilizando a característica principal de cada componente. A Figura 2.19 apresenta uma imagem de um corte transversal de uma ferramenta de corte com três camadas de revestimento. A camada mais externa é TiN, a intermediária é composta de Al_2O_3 e a mais interna é TiCN, em substrato de metal duro (WANIGARATHNE, 2005).

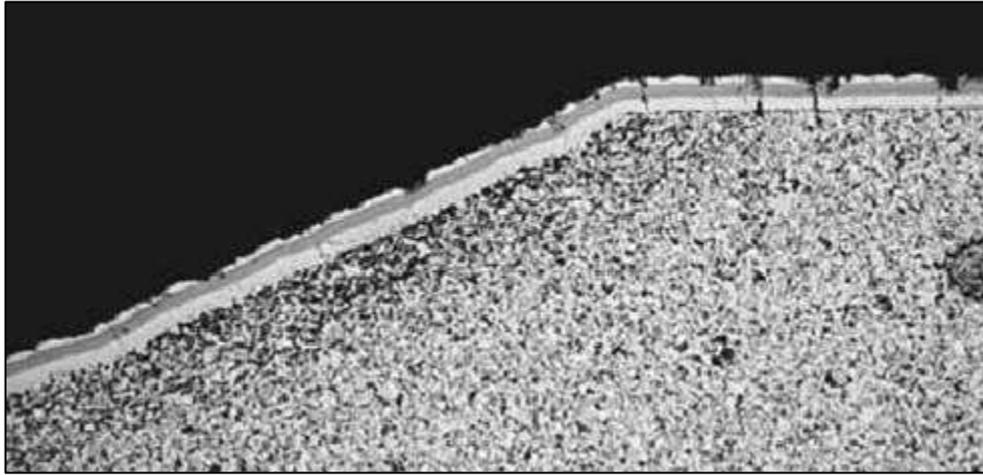


Figura 2.19. Corte transversal em um inserto recoberto com TiN, Al₂O₃ e TiCN (WANIGARATHNE, 2005).

2.3 Fluido de corte refrigerante

O efeito positivo do uso de fluidos de corte durante a usinagem foi primeiramente reportado por F. Taylor em 1894, noticiando que se aplicando grandes quantidades de água na área de corte a velocidade pôde ser aumentada em 33% sem diminuir a vida útil da ferramenta (ÁVILA, 2001)

O principal propósito da utilização de fluido de corte durante a usinagem de materiais é diminuir a temperatura do inserto durante o corte, aumentando a sua vida útil (DINIZ, 2007). O conhecimento a respeito do desempenho dos fluídos de corte quando aplicados em diferentes processos é importante para aumentar a eficiência de qualquer tipo de usinagem. Esta eficiência pode ser medida, além da vida útil do inserto, através da rugosidade da superfície da peça usinada (ÁVILA, 2001).

O fenômeno principal no qual os fluidos de corte auxiliam é a minimização do aquecimento do inserto. Diversos estudos a respeito da temperatura de corte vêm sendo realizados devido a sua grande influência no desgaste da ferramenta de corte. Entretanto, existem poucos estudos a respeito do seu processo de geração (HIRAO, 1998). A formação de um filme de fluido entre a interface inserto-peça é de fundamental importância para minimização da temperatura nessa região.

2.3.1 Tipos de fluidos de corte

Podemos classificar, de uma forma simples, os fluidos de corte como sendo integrais ou solúveis. Os óleos integrais não são miscíveis em água e sua utilização está diminuindo devido ao ataque a saúde do operador, e devido ao seu custo pois possuem deterioração acelerada, risco de incêndio e ineficiência de lubrificação a altas temperaturas. Já os fluidos solúveis são classificados como emulsionáveis ou sintéticos (não contém óleo de petróleo), sendo menos agressivos a saúde do operador, possuem maior vida útil e boa capacidade de remoção do cavaco.

Webster (1995) propôs um comparativo entre diferentes tipos de fluidos de corte, comparando-os de acordo com características do processo e também ambientais. A Tabela 2.1 apresenta o comparativo.

Tabela 2.1. Comparativo entre as características dos fluidos. 1-ruim, 2-regular, 3-bom, 4-ótimo (WEBSTER, 1995).

	<i>Sintético</i>	<i>Semi-sintético</i>	<i>Óleo solúvel</i>	<i>Óleo mineral</i>
Calor removido	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Dano – Meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1

2.3.2 Temperatura de corte

A maioria da energia usada em processos convencionais de usinagem é convertida em calor. A usinagem de metais ferrosos podem atingir aproximadamente 1350 °C na zona de corte (TREND, 1991). A Figura 2.20 apresenta a temperatura de corte (T_c) em dois pontos de um inserto em relação à velocidade de corte (V_c) utilizada. A letra (A) refere-se à região entre o inserto e o cavaco e a letra (B) informa as temperaturas da face de corte.

Com o aumento das velocidades de corte que vêm sendo empregadas no processo, as condições para a formação de um filme na interface peça-inserto são dificultadas. Nesse caso, a aplicação de fluido de corte para minimizar as altas temperaturas na região de corte não é tão efetiva devido ao fato do fluido não conseguir acesso na zona onde a maior parte do calor é gerada. Entretanto, a ação refrigerante é útil para reduzir o volume de material da ferramenta que será danificado pelo excesso de calor (TRENT, 1984).

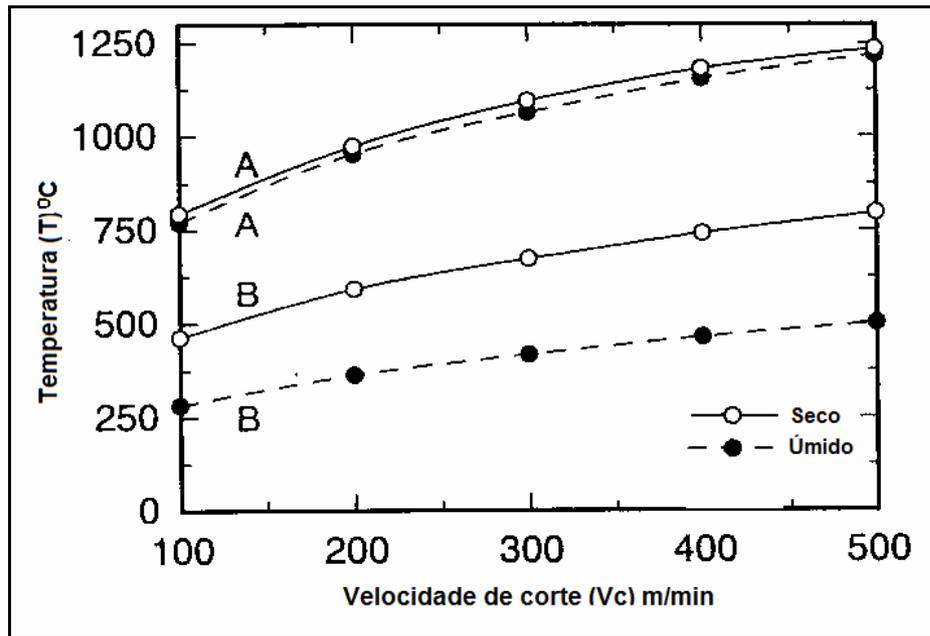


Figura 2.20. Relação entre temperatura e velocidade de corte em uma usinagem seca/úmida (MAEKAWA, 1998).

Hirao et al. (1998) propôs um modelo de análise térmica para a determinação da geração de calor na interface cavaco-inserto. Na Figura 2.21, o calor devido ao corte entre o material e a ferramenta flui pelas três seguintes áreas: plano de cisalhamento, face de corte e face de flanco. A taxa de calor gerada por estas três áreas é transferida para o cavaco, peça e inserto e é expressa como R_1 , R_2 e R_3 . Considerando-se que o calor gerado no plano de cisalhamento, face de corte e face de flanco para uma unidade de área e uma unidade de tempo é determinado como q_1 , q_2 , e q_3 , o valor do calor que flui para cada região é dado por $R_n q_n$.

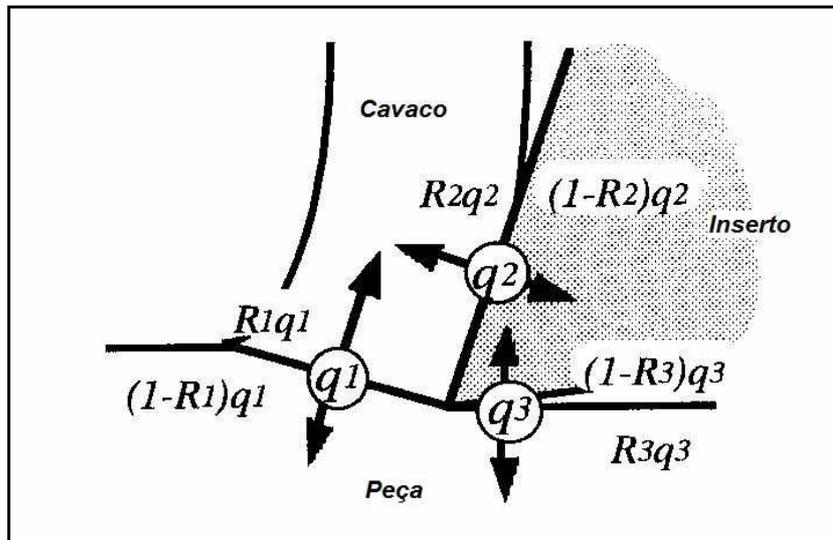


Figura 2.21. Modelo do fluxo de calor durante o corte (HIRAO, 1998).

Simulações podem ser realizadas para verificar as temperaturas alcançadas de acordo com o material a ser usinado e a velocidade de corte a ser empregado. A Figura 2.22 mostra a distribuição da temperatura em diversas regiões durante o processo de corte. Como pode ser visto, há geração de calor principalmente devido a deformação que ocorre no plano de cisalhamento e a fricção na face de corte ao longo do contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Em velocidades convencionais de usinagem, a maior parte do calor é dissipado no cavaco e apenas uma pequena parte flui para o inserto (UMBRELLO, 2007).

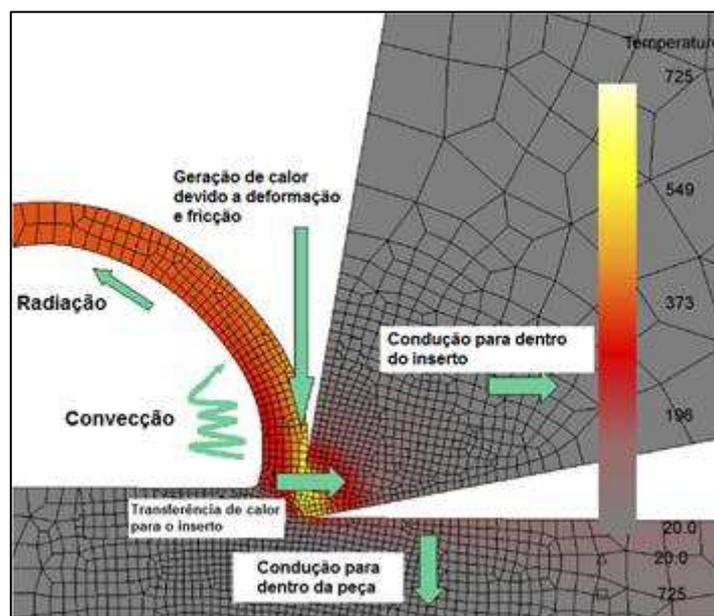


Figura 2.22. Propagação do calor durante o processo de usinagem (UMBRELLO, 2007).

Outro fator muito importante na temperatura de corte é o diâmetro da barra que está sendo usinada. De acordo com a Figura 2.23, quando uma velocidade de corte é fixada e varia-se o diâmetro das barras, o menor diâmetro apresentará uma maior temperatura inicial de corte. Com o passar do tempo, as temperaturas nos três diâmetros se equalizam (BOUD, 2007). Dessa forma, uma variável que muitas vezes é considerada como pouco influente no desgaste de um inserto mostra-se bastante importante e significativa. Esta maior temperatura de corte em barras de menor diâmetro pode ser explicada pela redução da dissipação do calor no volume de material disponível (DEVRIES, 1968).

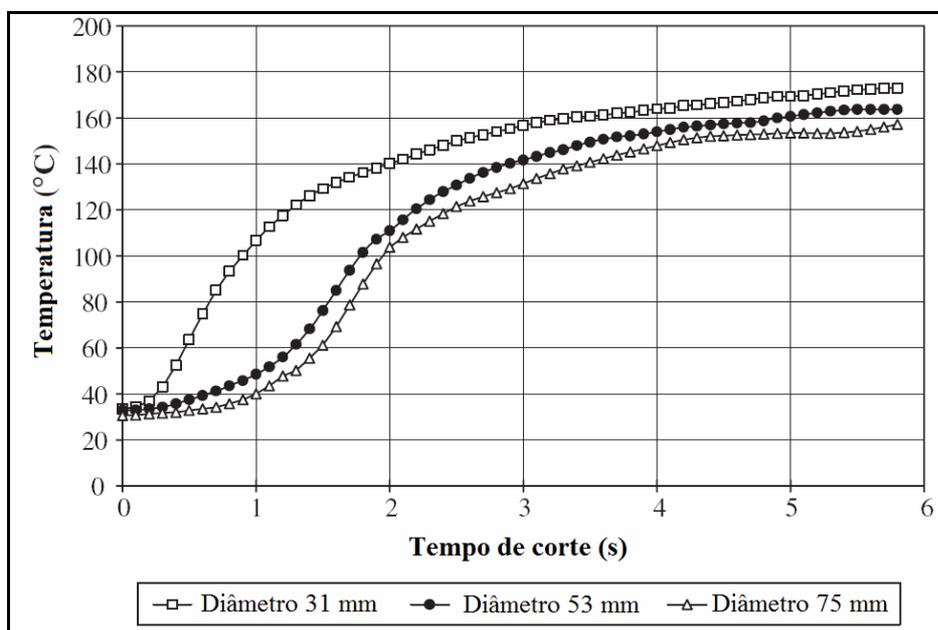


Figura 2.23. Variação da temperatura inicial de corte em relação ao diâmetro da barra (BOUD, 2007).

Outra forma de se analisar a temperatura de corte que pode ser empregada no processo é verificar a coloração do cavaco, com o prejuízo desta técnica ser bastante empírica. Colorações mais escuras demonstram uma maior temperatura de corte. A Figura 2.24 apresenta a variação da coloração do cavaco de acordo com o calor gerado em cada diâmetro usinado (BOUD, 2007).

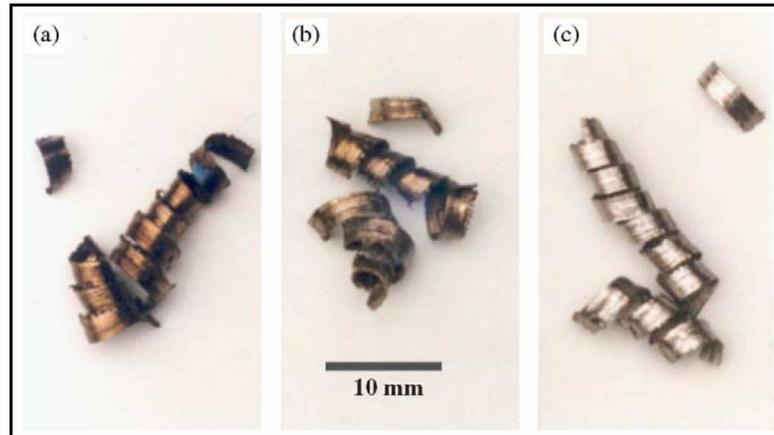


Figura 2.24. Aspecto do cavaco variando-se somente o diâmetro das barra. (a) 31 mm, (b) 53 mm e (c) 75 mm (BOUD, 2007).

2.3.3. Concentração do fluido de corte

Dependendo da velocidade de corte utilizada, outro fator importante na determinação da vida útil de uma ferramenta de corte é a concentração de fluido utilizada. Uma mesma concentração pode apresentar diversos comportamentos de acordo com a velocidade empregada. A Figura 2.25 demonstra que para uma velocidade de corte de 300 m/min, uma concentração de 3% de fluido de corte diluído em água resulta numa menor vida útil do inserto. Já com uma velocidade maior, de 400 m/min, esta menor concentração mostra-se mais benéfica à vida da ferramenta que uma concentração de 5% de fluido (ÁVILA, 2001).

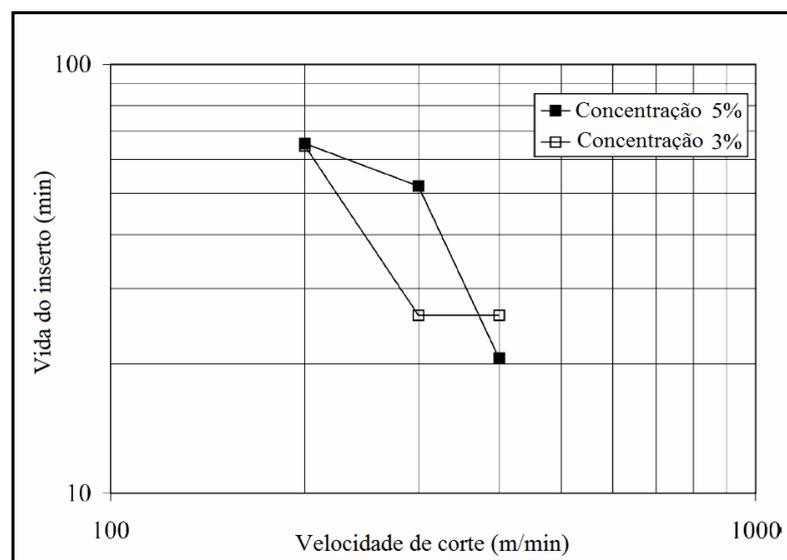


Figura 2.25. Efeito da concentração do fluido na vida útil do inserto (ÁVILA, 2001).

2.3.4 Vazão do fluido de corte

Em altas velocidades de corte, fluidos de corte convencionais não são efetivos para a minimização do calor na região de corte devido à dificuldade de penetrar na interface cavaco-peça (PAUL, 2000). A adição de jatos com alta pressão não assegura a penetração do refrigerante nessa área (CASSIN, 1965). Dessa forma, além do que já foi exposto e devido aos problemas ambientais e a saúde intrínsecos aos fluidos de corte, é conveniente a utilização de uma quantidade mínima de lubrificação (MQL), que assegura uma usinagem com a menor geração de calor possível. A Figura 2.26 apresenta o resultado do desgaste de flanco com diferentes meios de vazão do fluido de corte.

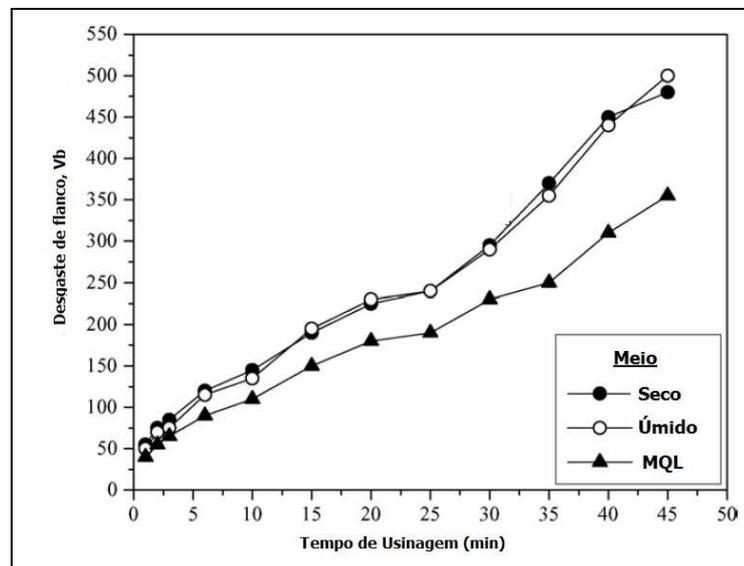


Figura 2.26. Efeito da vazão do fluido na vida útil do inserto (DHAR, 2006).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado nas instalações da usina produtora de aços especiais Gerdau Unidade Charqueadas. Utilizou-se uma máquina descascadeira de fabricação alemã, marca Kieserling, denominada DMH4, que processa barras laminadas na faixa de bitola entre 22 a 125 mm. Como já visto, podemos dividir a máquina sequencialmente entre rolos de tração, guias de entrada, cabeçote de descascamento, guias de saída e carro de tração/extração.

3.1 Matéria-prima

Barras laminadas de um aço DIN 16MnCr5 com diâmetro de 30,16 mm e comprimento de 6700 mm foram obtidas via processo de laminação a quente partindo de um tarugo de seção quadrada de 155 mm. A Tabela 3.1 mostra a composição química do material em questão.

Tabela 3.1. Composição química do aço DIN 16MnCr5, percentual em peso.

<i>Elemento</i>	<i>Fe</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Mo</i>	<i>Al</i>
%	resto	0,17	0,25	1,18	1,05	0,13	0,021	0,023	0,04	0,034

As barras laminadas deste aço são resfriadas no leito de resfriamento do laminador e apresentam a seguinte estrutura conforme a Figura 3.1. A dureza da matéria-prima varia entre 180 e 185 HB.

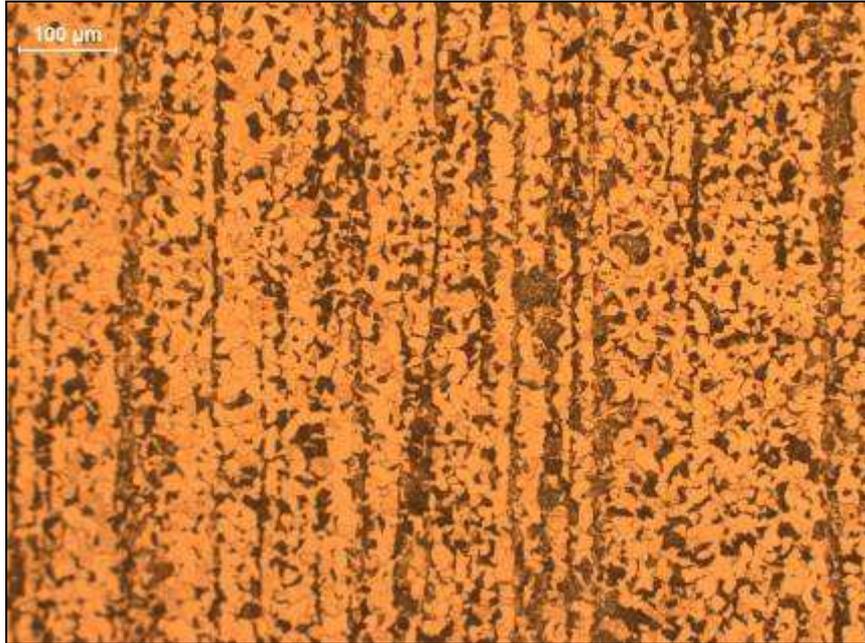


Figura 3.1. Microestrutura do produto laminado, apresentando estrutura perlita + ferrita, obtida através do resfriamento das barras no leito de laminação.

3.2. Insertos

Os insertos utilizados neste trabalho foram produzidos pela empresa Saar-Hartmetal und Werkzeuge, com sede na Alemanha.

A Figura 3.2 apresenta o desenho esquemático do inserto com suas dimensões. Estes insertos são denominados LPUC 121517 MF. A Tabela 3.2 possui as medidas das cotas apresentadas.

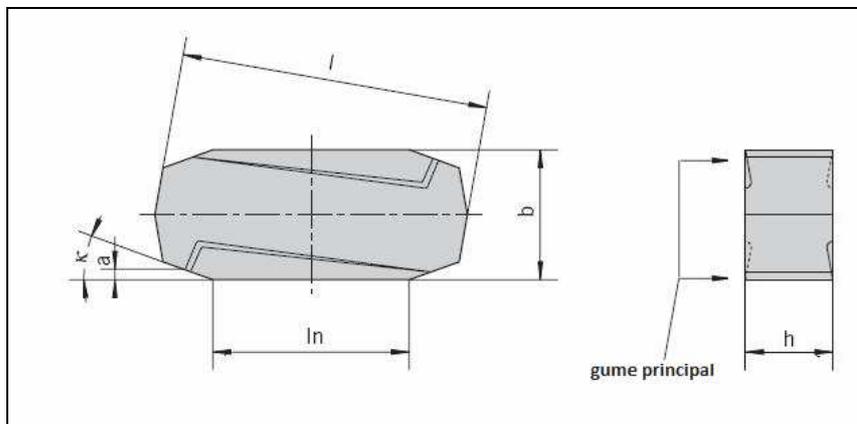


Figura 3.2. Desenho esquemático dos insertos utilizados.

Tabela 3.2. Medidas de cada cota apresentada na Figura 3.2.

<i>Cota</i>	<i>Medidas</i>
l	31,0 mm
b	12,0 mm
ln	17,00 mm
a	1,5 mm
h	7,5 mm
κ	20°

Foram testados dois tipos de insertos, ambos com a mesma geometria e substrato, metal-duro multi-classes P e K. A diferença principal entre os dois tipos de insertos a serem testados é a seqüência de aplicação dos revestimentos. A Tabela 3.3 apresenta os tipos de revestimentos VTA e VTS e sua seqüência de revestimentos. Esta denominação é utilizada comercialmente pelo fabricante. Já a Figura 3.3 apresenta um inserto de cada tipo a ser testado.

Tabela 3.3. Insertos VTS e VTA e sua seqüência de revestimento.

<i>Revestimentos</i>	<i>VTS</i>	<i>VTA</i>
1° (em contato com a barra)	Al ₂ O ₃	TiN
2°	TiC	Al ₂ O ₃
3°	TiCN	TiC
4° (em contato com o substrato)	TiN	TiN



Figura 3.3. Inserto VTS (esquerda) e inserto VTA (direita).

3.3. Parâmetros de descascamento

As barras laminadas de 30,16 +0,15/-0,15 mm de diâmetro serão usinadas para o novo diâmetro de 29,00 mm com tolerância dimensional ISO h11 (+0/-0,13 mm).

A Tabela 3.4 apresenta os parâmetros de corte a serem utilizados durante os testes.

Tabela 3.4. Parâmetros de descascamento utilizados nos testes.

<i>Parâmetro</i>	<i>Especificação</i>
Velocidade de corte (V_c)	120 m/min
Velocidade de avanço (V_f)	17,9 m/min
Avanço por rotação (f)	0,013 mm/rev
Profundidade de corte (a_p)	1,16 mm
Rotação do cabeçote (n)	1318 rpm

3.4 Fluido de corte

O fluido de corte a ser utilizado nos testes é do tipo semi-sintético, produzido pela Shell e denominado DMS 330. Este fluido é uma mistura de alcanolaminas, tensoativos, águas e aditivos. Possui pH 9,2 quando puro e densidade de 1,050 g/mL a 20 °C.

De acordo com o fabricante, sua aplicação em processos de usinagem deve ser realizada em diluição em água. Percentual de diluição pode variar entre 3 e 10%. A Tabela 3.5 apresenta os níveis de concentração a serem empregados durante os testes.

Tabela 3.5. Concentração de óleo a ser utilizada nos testes de descascamento.

<i>Nível</i>	<i>Concentração volumétrica em água</i>
Baixo	3%
Alto	6%

3.5 Análise estatística

Após definição das variáveis a serem testadas (classe de revestimento e concentração de fluido de corte), optou-se por utilizar a ferramenta estatística *Design of Experiments* (DOE) (MONTGOMERY, 1997) para realização dos ensaios. A definição e escolha das variáveis críticas deram-se a partir da literatura e possibilidade de variação destas variáveis de acordo com as possibilidades práticas.

A metodologia do DOE determina a relação entre fatores e suas interações que afetam o processo e os resultados do mesmo. O método tradicional de coletar grandes quantidades de dados mudando um dos parâmetros torna-se impossível pelo número de fatores que podem vir a influenciar no processo. Um modelo mais eficiente é o de fatorial em dois níveis para cada fator, assim o número de experimentos é reduzido, sendo que se pode considerar o resultado bastante coerente com índices de confiabilidade maiores que 90% (MONTGOMEY, 1997).

Os experimentos foram realizados utilizando uma matriz 2^2 para cada uma das variáveis. A Tabela 3.6 apresenta a seqüência de testes realizados.

Tabela 3.6. Matriz de execução dos testes.

<i>Testes</i>	<i>Inserto</i>	<i>Concentração</i>
1	VTS	3,0%
2	VTA	3,0%

3	VTS	6,0%
4	VTA	6,0%

3.6. Método de medição de desgaste

Para determinação do fim da vida útil de um inserto, convencionalmente utiliza-se a norma DIN ISO 3685. Nesta norma, o critério de fim de vida é a profundidade de cratera (KT), onde se determina um valor máximo, em função do avanço, para KT localizada na superfície de saída da ferramenta.

Em 1998, Summa propôs uma forma de medição para o desgaste de insertos no processo de descascamento. O autor determinou que o desgaste de flanco (V_b) é mais influente durante o descascamento e o método de medição é realizado da seguinte forma:

- Descasca-se certo comprimento de barras com diferentes insertos sob as mesmas condições;
- Após o fim do processo, mede-se o desgaste de flanco no gume principal e no quebra-cavaco com auxílio de microscopia eletrônica.

A Figura 3.4 apresenta uma representação dos desgastes de flanco e do desgaste de cratera. Os desgastes dos testes realizados foram medidos de acordo com a medida V_b da Figura 3.4 utilizando um microscópio marca OLYMPUS modelo BX60M.

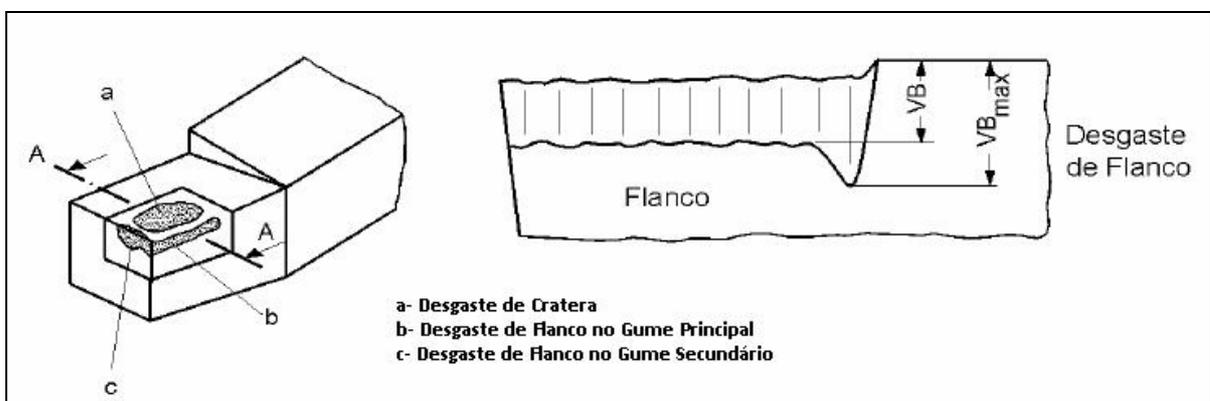


Figura 3.4 Representação dos tipos de desgastes (Adaptado de DINIZ, 2000).

Neste trabalho, serão testados os comprimentos de 1000 e 2000 m de descascamento de barras de mesmo diâmetro. A verificação de dois comprimentos visa verificar o comportamento do desgaste com o passar do tempo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em cada um dos quatro experimentos realizados sob cada condição proposta foram utilizados quatro insertos. O resultado apresentado na Tabela 4.1 é uma média de 16 medições do desgaste deste insertos, sendo 4 medições em cada. O desgaste apresentado é o de flanco (Vb), mais representativo no processo de descascamento.

Tabela 4.1. Desgaste de flanco em μm para cada condição de teste e comprimento total de barras usinadas.

<i>Testes</i>	<i>Inserto</i>	<i>Concentração</i>	<i>1000 m</i>	<i>2000 m</i>
1	VTS	3,0%	105	132
2	VTA	3,0%	93	121
3	VTS	6,0%	130	131
4	VTA	6,0%	106	116

4.1. Resultados dos testes de descascamento

A seguir, são apresentados os resultados obtidos dos testes realizados no processo de descascamento. Os resultados foram analisados utilizando-se o software Minitab para verificação estatística. Os gráficos foram elaborados nos software Excel e Minitab.

4.1.1. Desgaste após a usinagem de 1000 metros de barra

A partir dos dados obtidos, é possível verificar a interação das variáveis através da Figura 4.1.

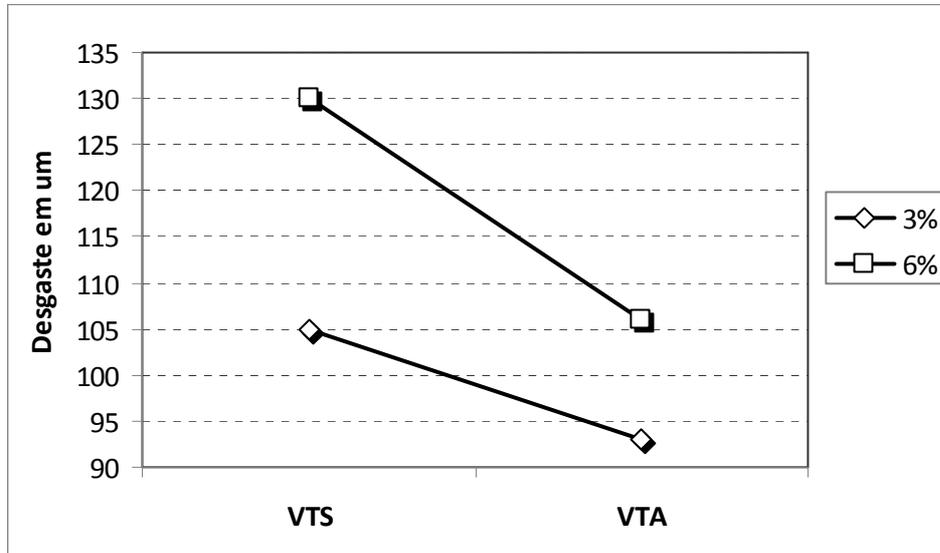


Figura 4.1. Interação entre as variáveis para o descascamento de 1000 m de barras.

A Figura 4.2 apresenta a variabilidade do desgaste para 1000 metros de barra descascada através da ferramenta gráfica Boxplot.

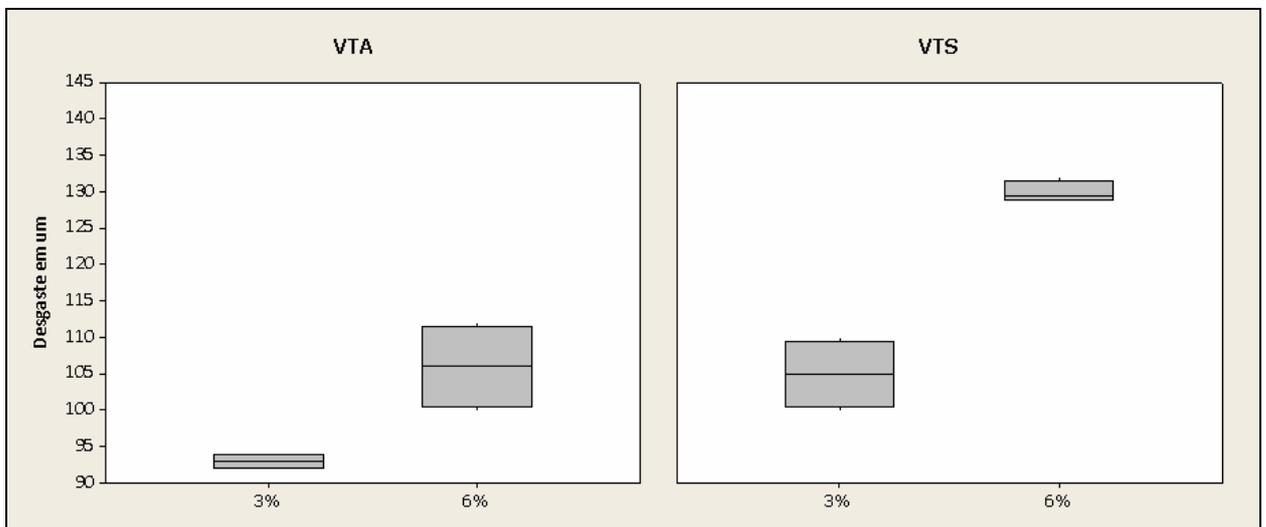


Figura 4.2. Variabilidade dos ensaios realizados com 1000 metros de barra descascada (boxplot).

Para a usinagem de 1000 m de barra, o inserto VTA apresenta um menor desgaste em ambas as concentrações testadas. Nota-se também que a concentração mais baixa de fluido de corte apresentou um menor desgaste.

A menor variabilidade foi apresentada no ensaio com concentração de 3% de fluido de corte em água e com revestimento VTA.

As Figura 4.3 a 4.6 apresentam o desgaste para os testes.

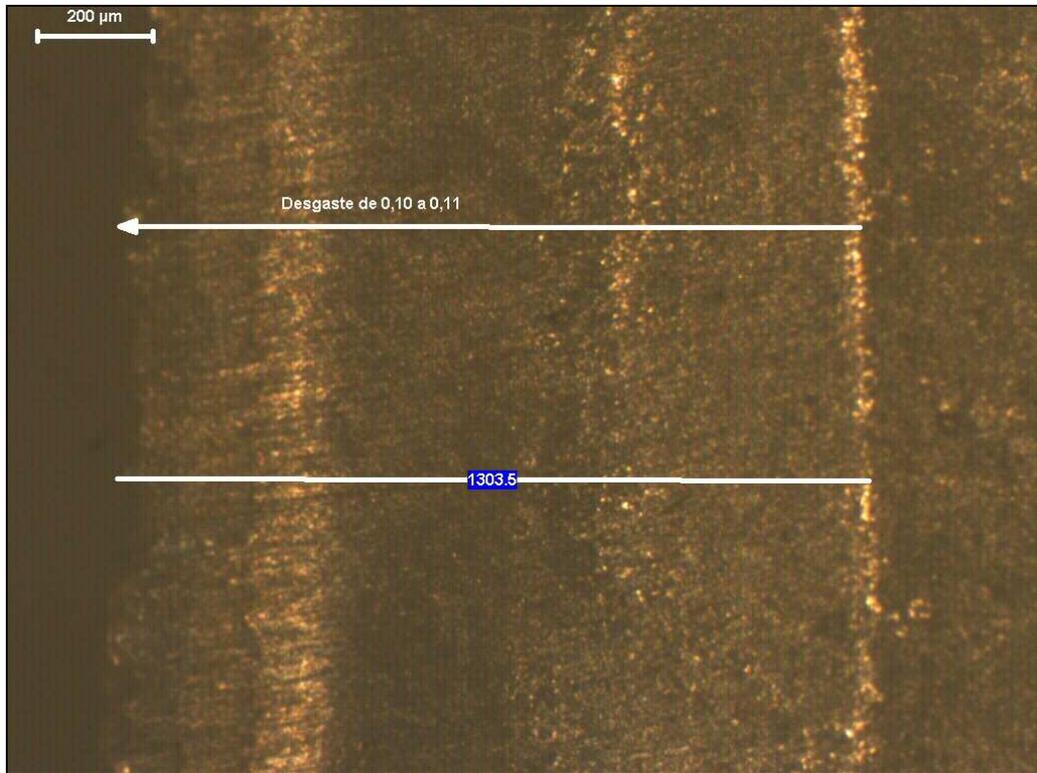


Figura 4.3. Desgaste do teste 1 (VTS, 3%) com 1000 metros de barra processada.



Figura 4.4. Desgaste do teste 2 (VTA, 3%) com 1000 metros de barra processada.

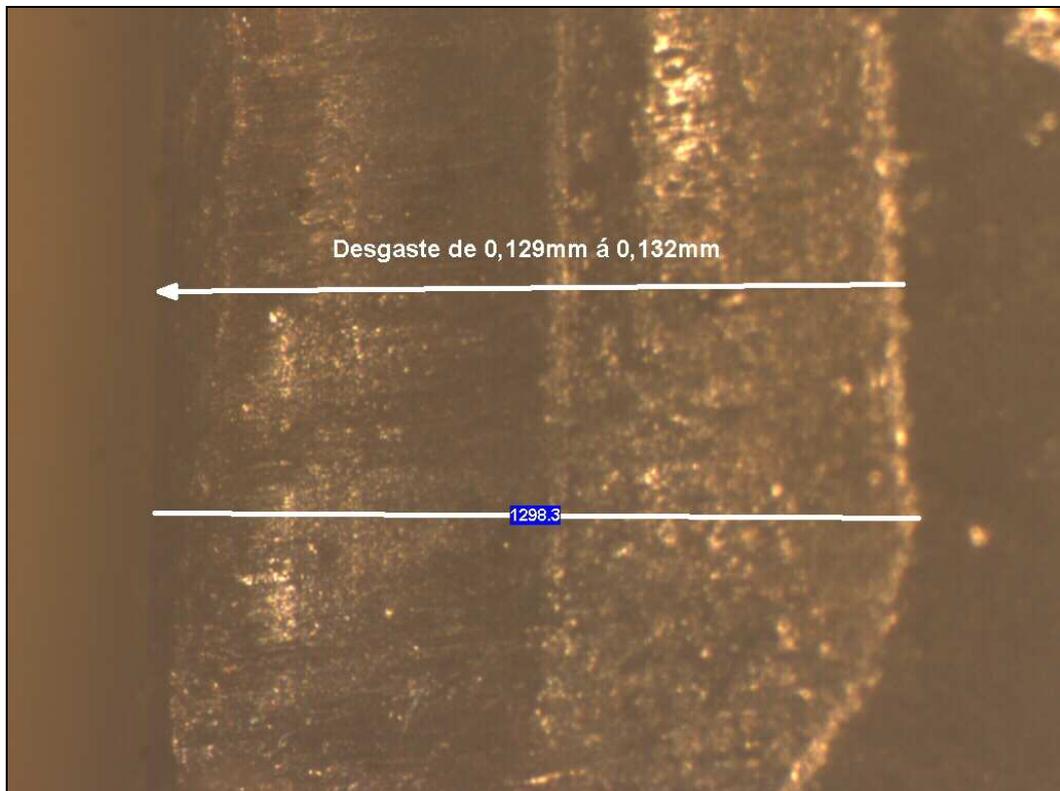


Figura 4.5. Desgaste do teste 3 (VTS, 6%) com 1000 metros de barra processada.

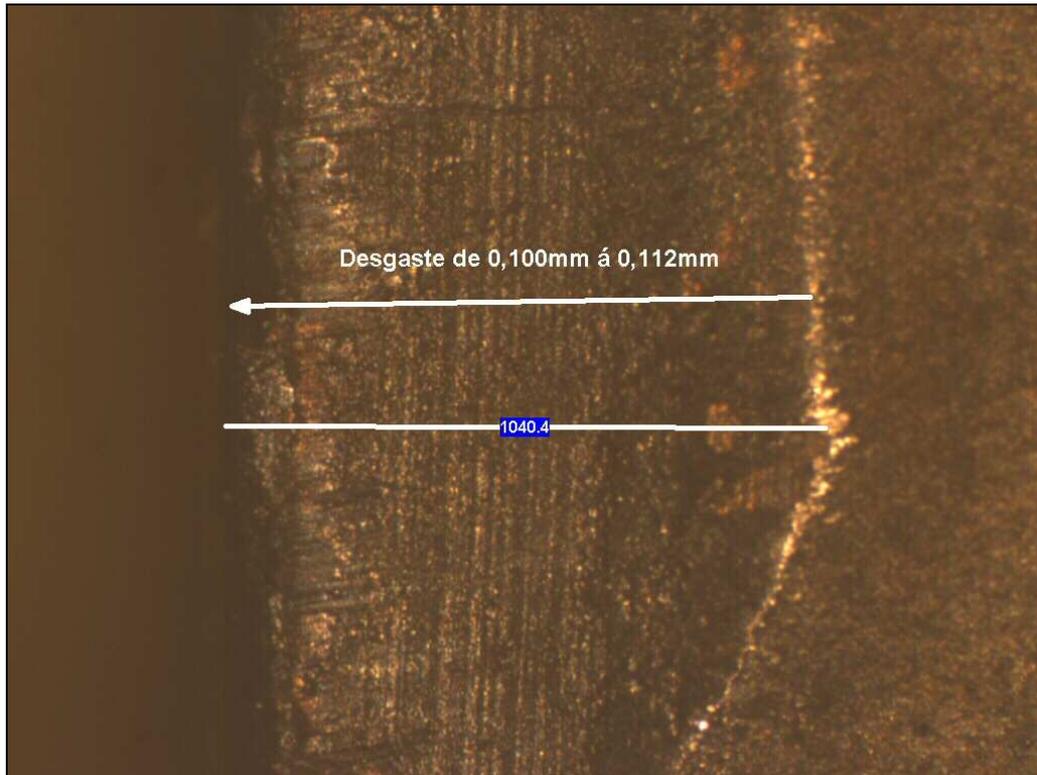


Figura 4.6. Desgaste do teste 4 (VTA, 6%) com 1000 metros de barra processada.

As Figuras 4.3 a 4.6 apresentam os desgastes para os ensaios com 1000 metros de barra descascada. O teste 2 apresentou o menor desgaste na média.

4.1.2. Desgaste após a usinagem de 2000 metros de barra

A interação das variáveis concentração do fluido de corte em água e revestimento para a condição de descascamento de 2000 metros de barras é apresentada na Figura 4.7.

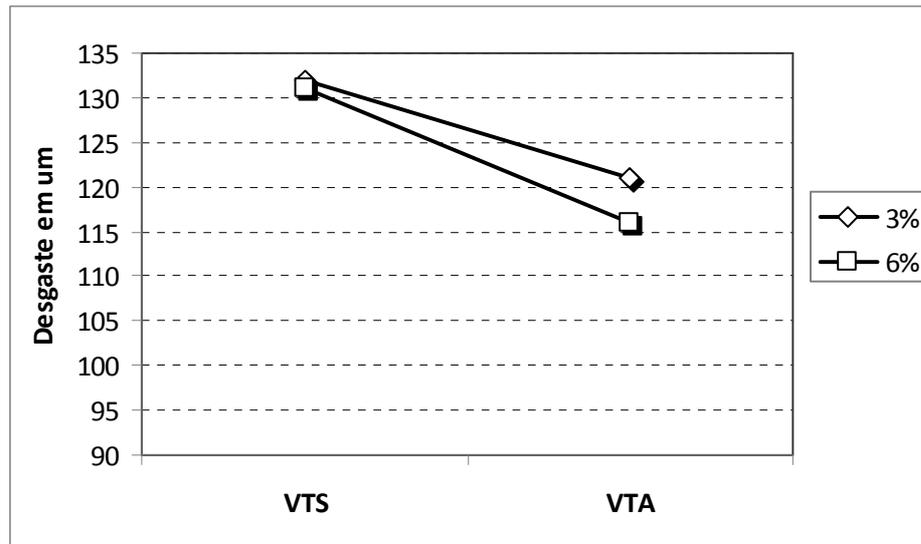


Figura 4.7. Interação entre as variáveis para o descascamento de 2000 m de barras.

A Figura 4.8 apresenta a variabilidade para o descascamento de 2000 metros de barra.

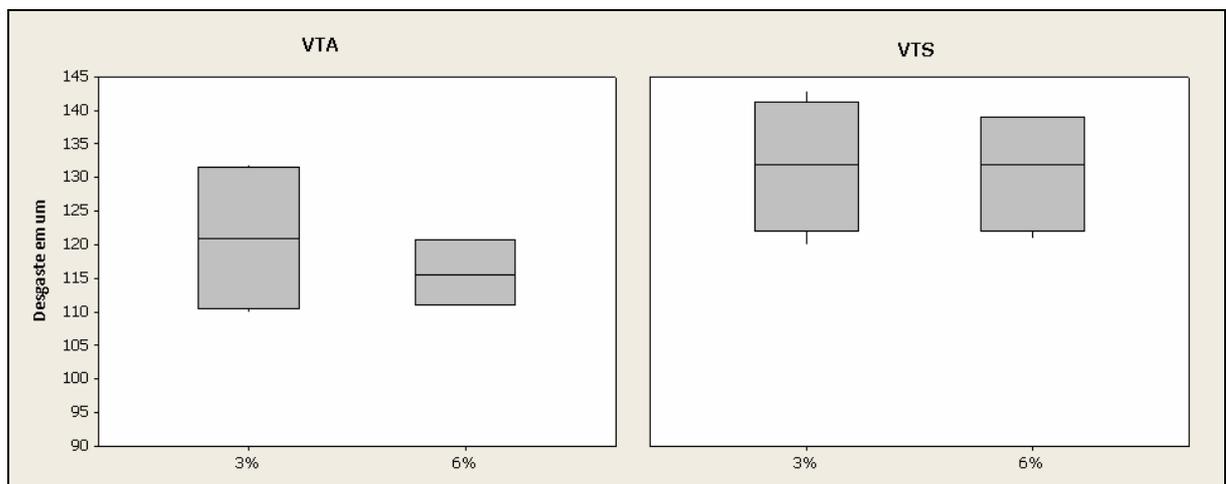


Figura 4.8. Variabilidade dos ensaios realizados com 2000 metros de barra descascada (boxplot).

Da mesma forma do que no ensaio com 1000 metros de barra processada, no teste com 2000 metros, o inserto VTA também apresentou um menor desgaste, embora que a diferença do desgaste para o VTS não seja mais tão significativa.

Diferentemente do que no ensaio com 1000 metros, a concentração de 6% de fluido de corte apresentou em média um menor desgaste para o inserto VTA.

Para esta metragem de barra descascada, a variabilidade dos desgastes é maior. A ocorrência dessa maior variabilidade pode estar relacionada ao desprendimento da primeira camada do revestimento.

As Figuras 4.9 a 4.12 apresentam os desgastes para cada condição testada.

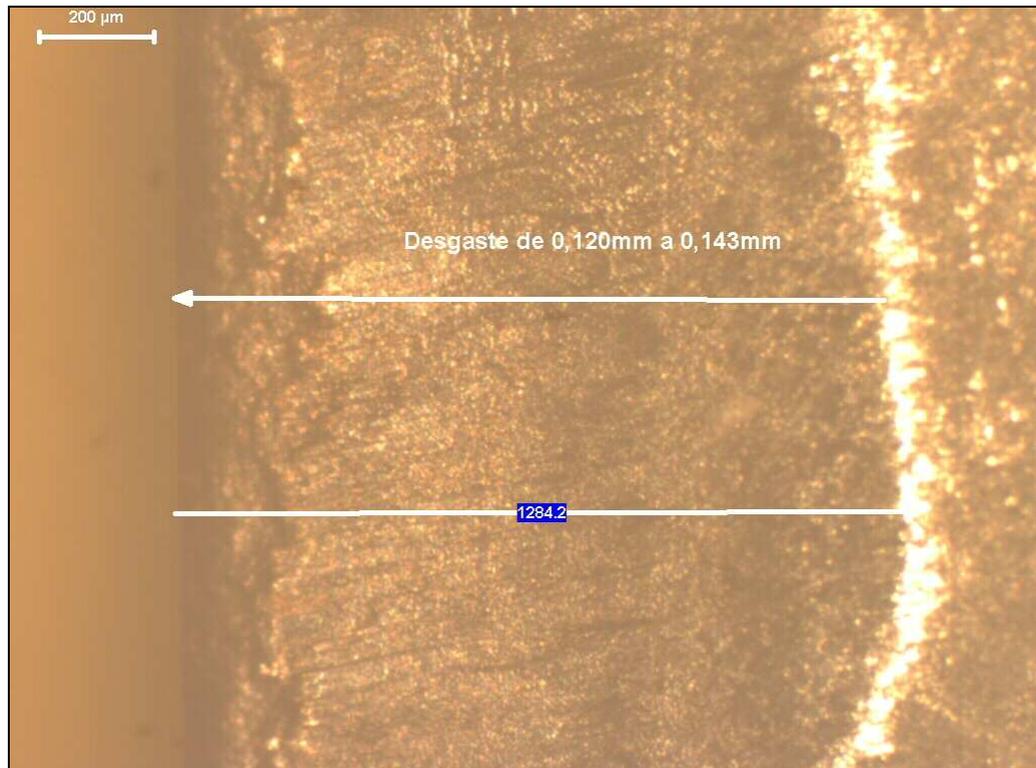


Figura 4.9. Desgaste do teste 1 (VTS, 3%) com 2000 metros de barra processada.

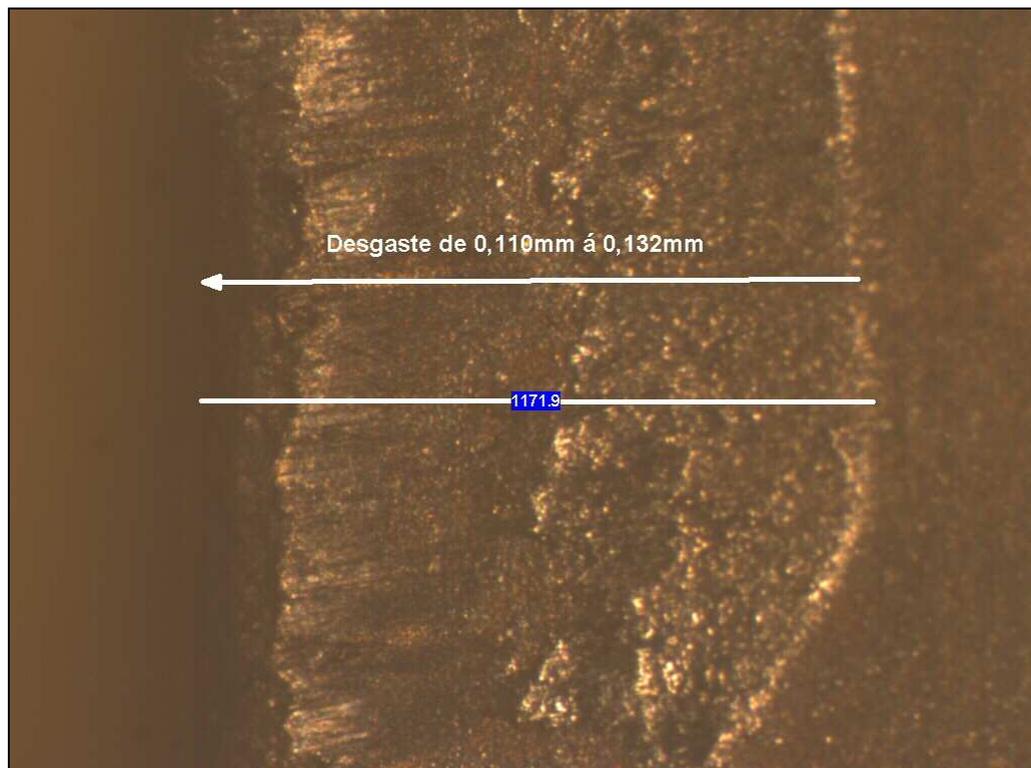


Figura 4.10. Desgaste do teste 2 (VTA, 3%) com 2000 metros de barra processada.

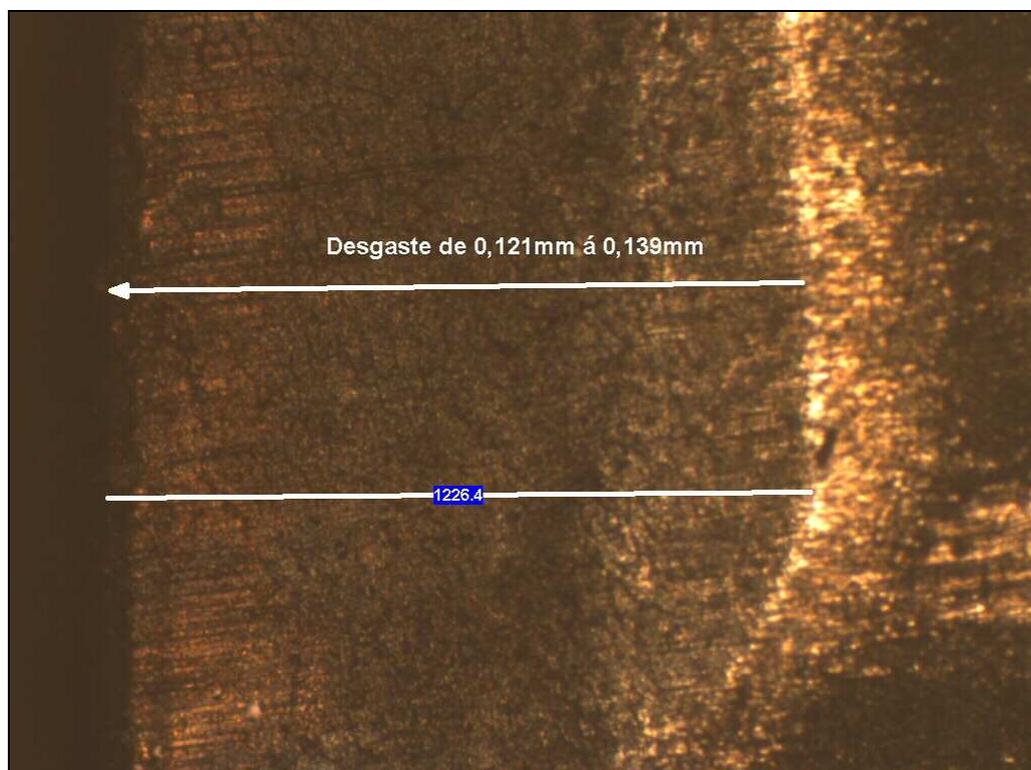


Figura 4.11. Desgaste do teste 3 (VTS, 6%) com 2000 metros de barra processada.

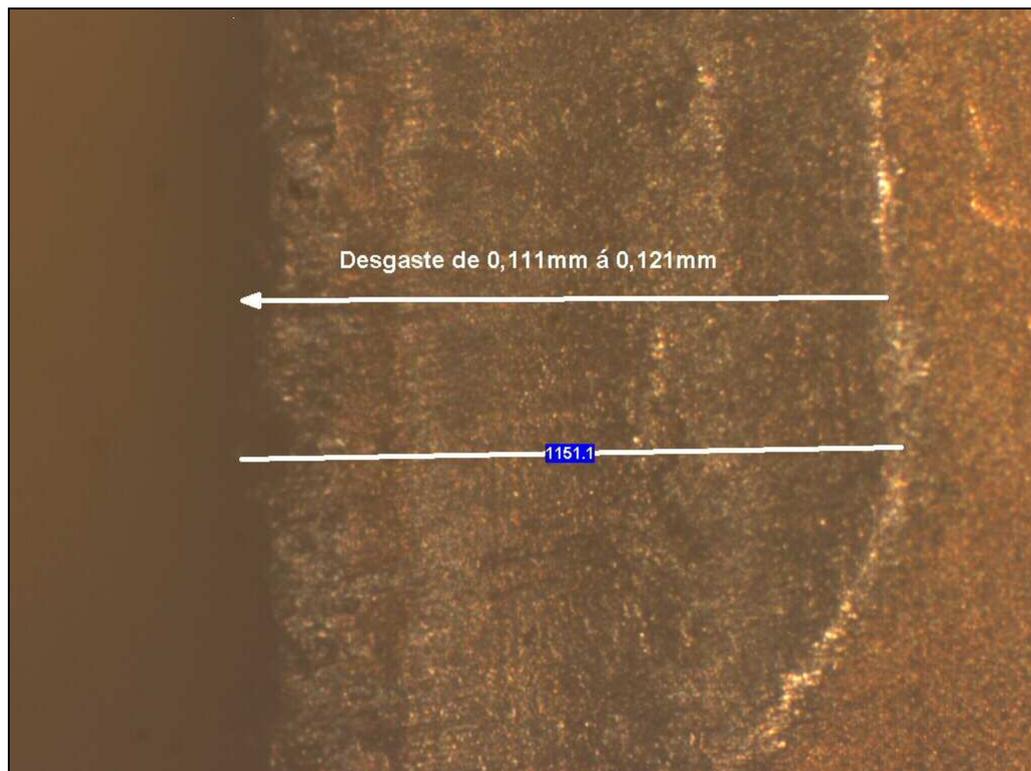


Figura 4.12. Desgaste do teste 4 (VTA, 6%) com 2000 metros de barra processada.

As Figuras 4.9 a 4.12 apresentam os desgastes para os ensaios com 1000 metros de barra descascada. O teste 4 apresentou o menor desgaste na média.

4.2. Influência do fluido de corte

Como visto nos resultados dos testes, o desgaste em função da concentração do fluido de corte apresenta um comportamento variado de acordo com a metragem de barras descascadas e com o revestimento de inserto utilizado.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam o desgaste para cada tipo de revestimento de acordo com a concentração de fluido de corte e quantidade de barras descascadas.

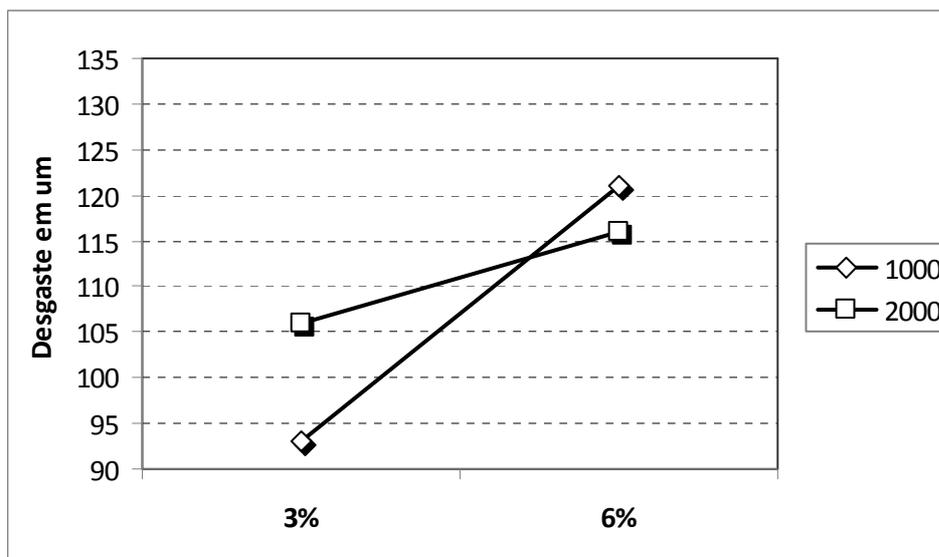


Figura 4.13. Desgaste para o inserto VTA de acordo com a concentração e quantidade de barra descascada.

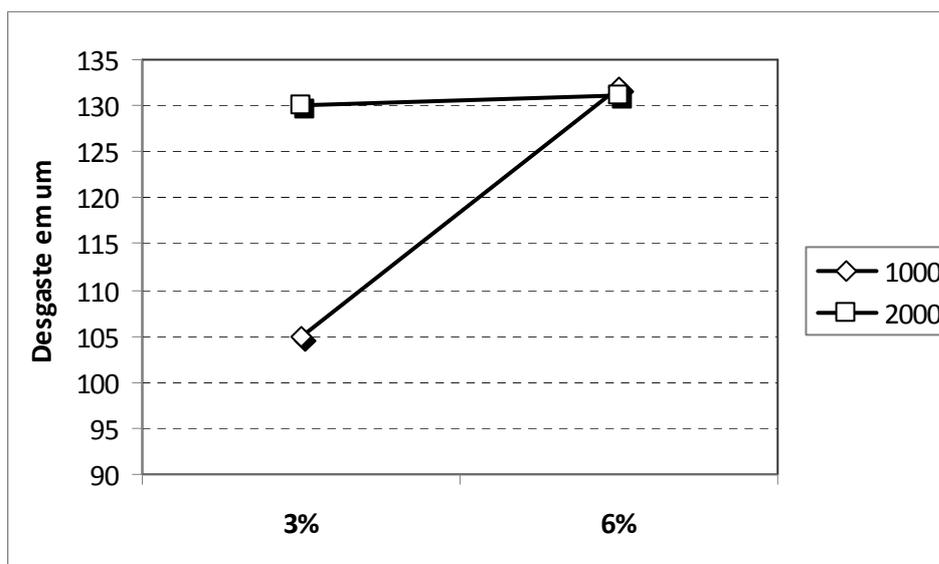


Figura 4.14. Desgaste para o inserto VTS de acordo com a concentração e quantidade de barra descascada.

A Figura 4.13 demonstra que para ambas as condições de comprimento de barra descascada, 1000 e 2000 metros, e para ambos os revestimentos testados, VTA e VTS, a concentração de 3% apresenta um menor desgaste.

Ávila (2001) já demonstrou que para algumas determinadas velocidades de corte uma maior concentração de fluido de corte não necessariamente apresentaria um menor desgaste

no inserto. Um dos motivos para este comportamento pode ser explicado pela vazão do fluido de corte. Como demonstrado por Paul (2000), certas velocidades de corte não são benéficas para a entrada de fluido na interface cavaco-peça, o que pode acarretar um maior desgaste do revestimento não importando a concentração de fluido em água.

A pouca influência da concentração do fluido de corte pode ser evidenciada pela coloração e aspecto dos cavacos em cada um dos quatro testes. A Figura 4.15 apresenta a coloração dos cavacos para cada condição.

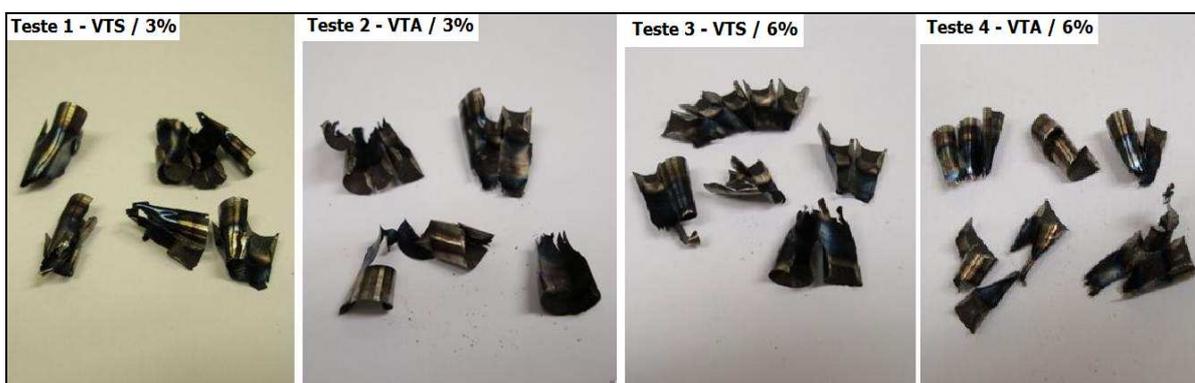


Figura 4.15. Coloração do cavaco para cada condição testada.

Como comentado por Boud (2007), uma coloração semelhante no cavaco indica uma mesma temperatura durante o corte. A Figura 4.15 apresenta a semelhança entre as colorações entre os cavacos dos quatro testes, o que pode explicar a pouca influência da concentração do fluido de corte no desgaste.

Para a concentração de 3%, o fim da vida útil do inserto VTS ocorreu com aproximadamente 3050 metros de barra usinada e para o inserto VTA com 4230 metros. Para a concentração de 6%, fim da vida útil do inserto VTS ocorreu com 3010 metros e do inserto VTA com 4150 metros. Isso representa uma maior vida útil do inserto com camada externa de TiN em 38% em comparação ao inserto com camada externa de Al_2O_3 para ambas as concentrações testadas.

O fim da vida útil é determinado pelo aumento da variação no diâmetro das barras após descascamento e também pelo aumento dos sulcos de usinagem e rugosidade.

4.3. Influência do revestimento

Os resultados dos testes verificando a influência do revestimento sob o desgaste de flanco são apresentados na Figura 4.16, com concentração de fluido de corte em 3%, e na Figura 4.17, com concentração de fluido de corte em 6%.

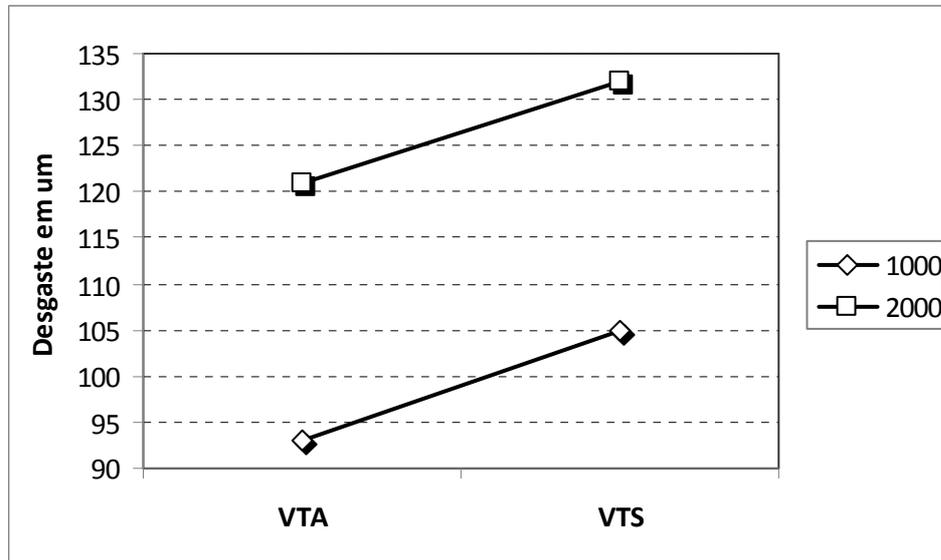


Figura 4.16. Desgaste para a concentração de 3% de acordo com o revestimento e comprimento de barra descascada.

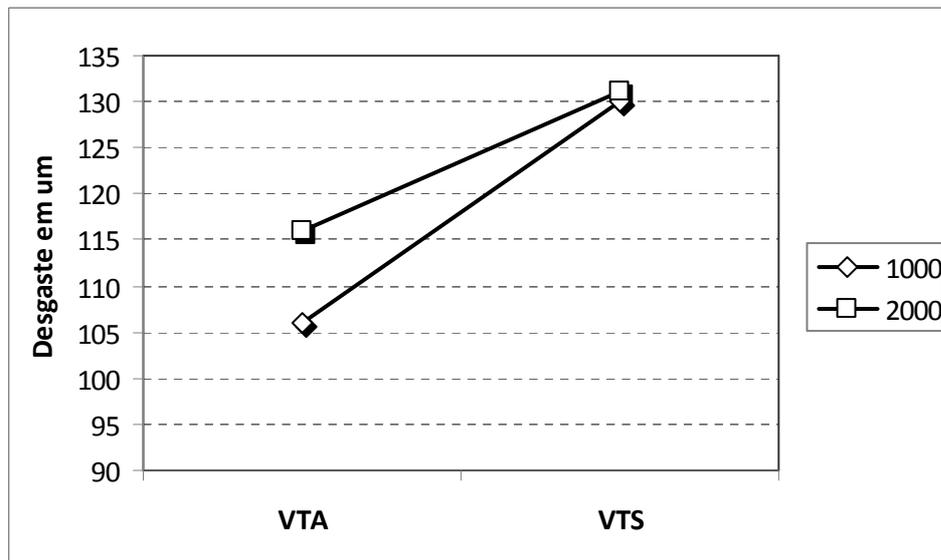


Figura 4.17. Desgaste para a concentração de 6% de acordo com o revestimento e comprimento de barra descascada.

A partir das Figuras 4.16 e 4.17, podemos verificar um menor desgaste do revestimento VTA para ambas as concentrações de fluido de corte.

No trabalho de Ruppi (1998), o autor constata um maior desgaste ocorrido por um inserto somente revestido por Al_2O_3 em comparação a outros, revestidos somente por TiN, TiC, TiCN dentre outros, devido a menor tenacidade apresentada pela alumina, que constata-se como crítica para uma operação de desbaste severa como o descascamento de barras. Esta condição leva à uma condição de altas tensões sobre a ferramenta e vibrações e choques devido à presença de camadas oxidadas na peça, sendo desta forma crítica para o revestimento mais frágil de Al_2O_3 . As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam o desgaste de insertos VTA e VTS, respectivamente, com uma concentração de fluido de corte de 6%.

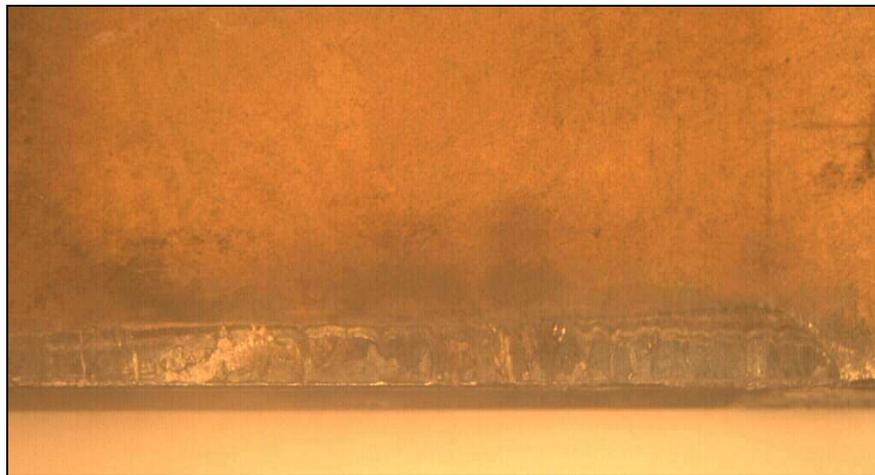


Figura 4.18. Desgaste em um inserto com revestimento VTA na concentração de 6% após 2000 metros de barra descascada (aumento 20X).

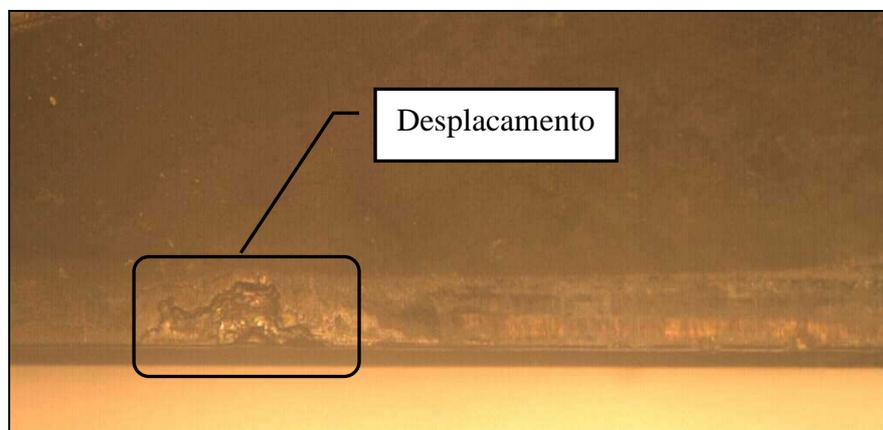


Figura 4.19. Desgaste em um inserto com revestimento VTS na concentração de 6% após 2000 metros de barra descascada (aumento 20X).

A partir das Figuras 4.18 e 4.19 é possível visualizar o tipo de desgaste ocorrido em cada uma das condições. A ferramenta de corte revestida com alumina em sua última camada apresentou desgaste devido ao deslocamento dessa camada, diferentemente da ferramenta revestida com TiN.

Este melhor resultado do inserto VTA provavelmente deve-se ao modo de corte realizado no descascamento, onde barras laminadas brutas com superfícies irregulares são levadas até os insertos, provocando choques mecânicos, uma vez que a fixação da peça a ser usinada não é tão eficaz quanto em outras formas de usinagem. Como a alumina possui baixa resistência ao impacto, o desgaste pode ter ocorrido devido a estes choques mecânicos.

4.4. Interação entre as variáveis

Analisando-se os resultados dos desgastes apresentados por cada teste com o programa Minitab, utilizado largamente para análises estatísticas, pode-se determinar qual das variáveis analisadas apresenta maior significância no processo de desgaste.

Para uma confiabilidade de 90% no DOE realizado, nenhuma das variáveis apresentou significância para ambos os comprimentos de teste. A Figura 4.20 apresenta o Pareto para 1000 m e a Figura 4.21 o pareto para 2000m.

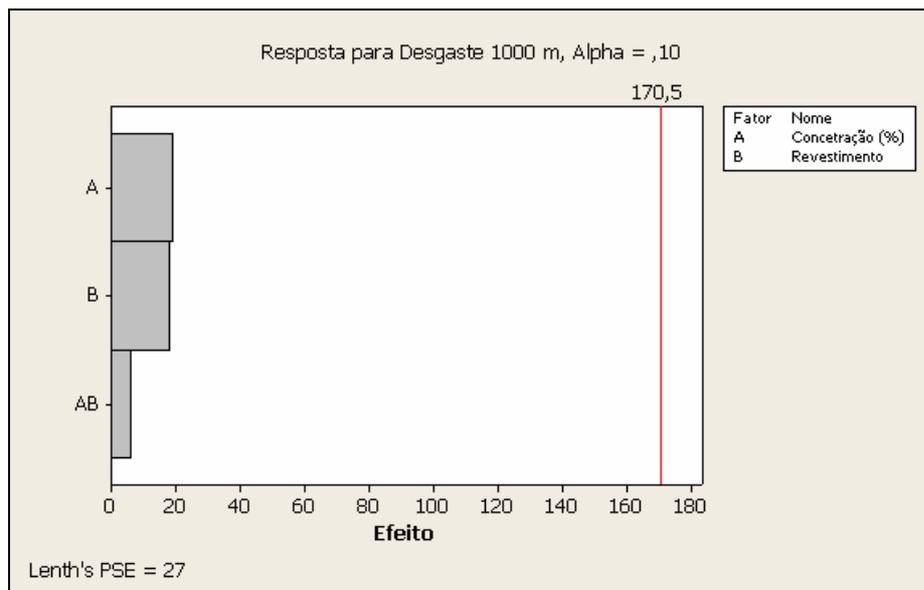


Figura 4.20. Significância do DOE para o descascamento de 1000 m com 90% de confiabilidade.

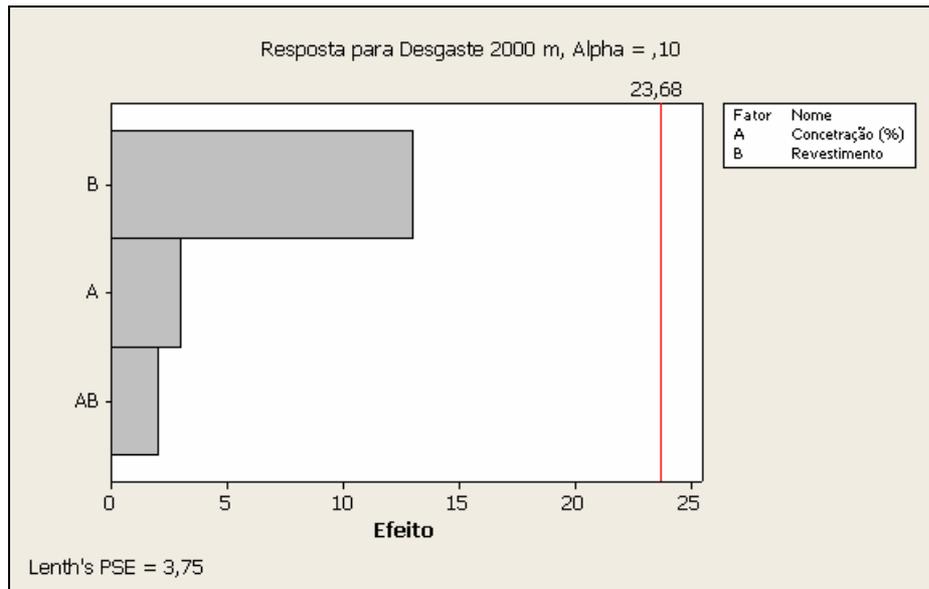


Figura 4.21. Significância do DOE para o descascamento de 2000 m com 90% de confiabilidade.

Para o comprimento de 1000 metros de barra descascada, a concentração de óleo mostrou maior significância. Já para 2000 m, o revestimento do inserto mostrou-se mais significativo.

As Figuras 4.22 e 4.23 demonstram a confiabilidade onde um dos parâmetros testados começa a apresentar significância para o descascamento de 1000 e 2000 metros.

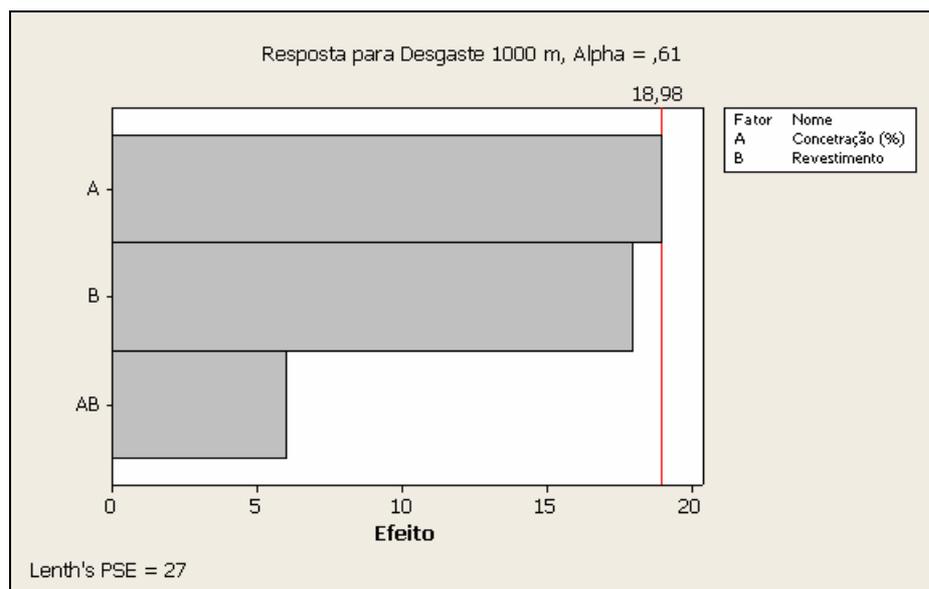


Figura 4.22. Significância do DOE para o descascamento de 1000 m com 39% de confiabilidade.

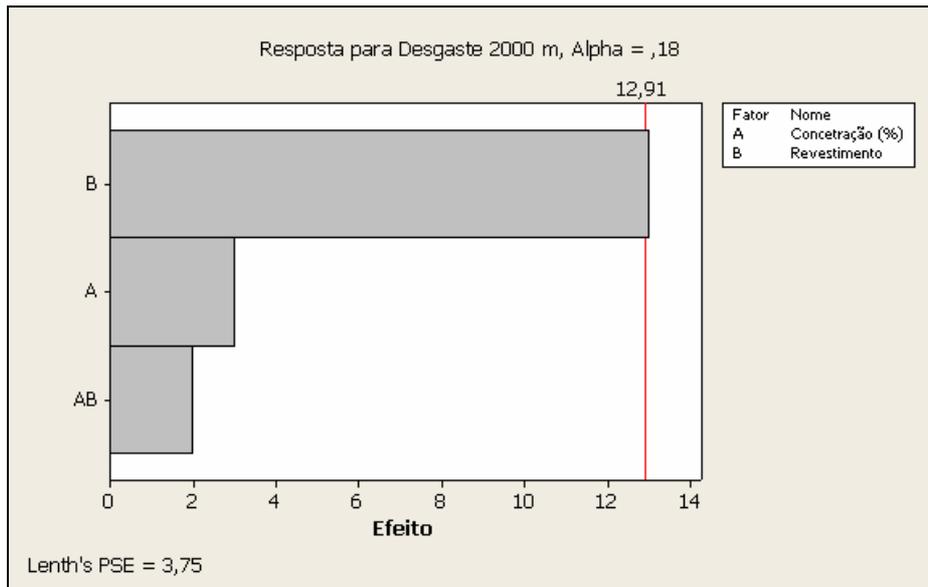


Figura 4.23. Significância do DOE para o descascamento de 2000 m com 82% de confiabilidade.

As Figuras 4.22 e 4.23 demonstram que para o descascamento de 1000 metros de barra, pode-se afirmar que a concentração é mais significativa no desgaste com uma confiabilidade de 39%. Já para 2000 metros, o revestimento é mais significativo com uma confiabilidade de 82%.

5. CONCLUSÕES

Ao longo deste trabalho, foram discutidos diversos aspectos referentes ao desgaste de ferramentas de corte utilizadas para usinagem tipo descascamento. A partir dos resultados apresentados e da bibliografia pesquisada, é possível concluir que:

- 1) Uma maior concentração de fluido de corte em água não é garantia de um menor desgaste para os insertos com os revestimentos testados;
- 2) Insertos com camada superficial de Al_2O_3 apresentam, em operações de descascamento, uma menor vida útil que insertos revestidos por TiN;
- 3) O modo de usinagem do descascamento não é benéfico para insertos revestidos com alumina, devido ao elevado grau de impacto que a barra proporciona a ferramenta causando o trincamento e posterior lascamento do mesmo;
- 4) A variabilidade entre os desgastes para 1000 e 2000 metros de barras descascadas é menor para a condição de 1000 metros, provavelmente devido ao desgaste da primeira camada;
- 5) O inserto com revestimento VTS apresenta um fim de vida útil mais precoce que o VTA;
- 6) Dentre as duas variáveis testadas, concentração de fluido de corte em água e revestimento do inserto, não é possível afirmar com elevado grau de confiança qual variável apresenta maior significância no processo de desgaste de flanco;

- 7) Utilizando-se o inserto até o fim de sua vida útil, a ferramenta de corte com camada externa de TiN possui uma vida útil 38% maior em comparação ao inserto com camada externa de Al₂O₃, para ambas as concentrações testadas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Das perspectivas abertas durante a realização deste trabalho, podemos citar as seguintes sugestões:

- Verificar se o comportamento do desgaste com uma menor concentração de fluido de corte se comporta da mesma forma;
- Verificar a influência e interação de variáveis relacionadas ao processo de usinagem, tais como velocidade de corte, avanço e rotação;
- Ampliar número de variáveis testadas nos mesmos testes para verificar o desgaste e suas interações.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Metals Handbook**. Vol. 16, 9 ed. 1993.

AMORIM, H. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Dissertação. PROMEC, UFRGS, 2002.

ÁVILA, R. F., ABRÃO, A. M. **The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 119, p. 21-26, 2001.

Boletim técnico – insertos para descascamento. Disponível em <http://www.saar-hartmetall.de>. Acessado em 20 de abril de 2009.

BOUD, F. **Bar diameter as an influencing factor on temperature in turning**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, p. 223-228, 2007.

BRITO, R. F. et al. **Thermal analysis in coated cutting tools**. International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 36, p. 314-321, 2009.

CASSIN, C.; BOOTHROYD, G. **Lubrication action of cutting fluids**. Journal of Mech. Eng. Sci, p. 67-81, 1965.

CHANDRASHEKAR, A.; CALLARMAN, T. E. **A modelling study of the effects of continuous incremental improvement in the case of a process shop.** European Journal of Operational Research, p. 111-121, 1998.

COROMANT, S. **Modern Metal Cutting: a Practical Handbook.** Tofters Tryckery AB, Suécia, 1994.

COSTA, E. S., SANTOS, D. J. **Processos de usinagem.** Apostila 1ª versão, CEFET-MG, 2006.

D'ERRICO, G. E. et al. **Influences of PVD coatings on cermet tool life in continuous and interrupted turning.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 78, p. 53-58, 1998.

DEAN, T. A. **The net-shape forming of gears.** Materials & Design, Vol. 21, p. 271-278, 2000.

DEMING D.E. **Out of the Crisis.** Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

DEVRIES, M.F., et al. **Temperature distributions in drilling.** Journal of Engineering for Industry, Transactions ASME 90, p. 231-238, 1968.

DHAR, N. R.; et al. **Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel.** Journal of Materials Processing Technology, Vol.172, p. 299-304, 2006.

DINIZ, A. E., et al. **Tecnologia da Usinagem dos Metais.** Ed. Artliber, São Paulo, 2000.

DINIZ, A. E., MICARONI, R. **Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, p. 247-254, 2007.

FANG, T.H., et al. **Nanomechanical properties of TiC, TiN and TiCN thin films using scan probe microscopy and nanoindentation.** Applied Surface Science, Vol. 228, p. 365-372, 2004.

Ficha de informações de segurança do produto químico Shell DMS 330. Shell Brasil Indústria Química.

GRZESIK, W., NIESLONY, P. **Physics based modelling of interface temperatures in machining with multilayer coated tools at moderate cutting speeds.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 44, p. 889-901, 2004.

HIRAO, M. et al. **Behavior of cutting heat in high speed cutting.** Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 64, p.251-260, 1998.

INTERNACIONAL STANDARD ISO 3685/1993. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools, p. 48, 1993.

KHALID, F. A. **A note on the comparison of microstructure and coating characteristics of hardmetal inserts.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, p. 381-385, 2002.

MACHADO, A. R., SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** Apostila 5ª versão, Editora UFU, 1999.

MAEKAWA, K. et al. **Are cutting fluids effective in continuous high speed machining?** Proceedings of the Fourth International Conference on Behaviour of Materials in Machining, Stratford, p. 90-99, 1998.

MARUSICH, T. D., et al. **A methodology for simulation of chip breakage in turning processes using an orthogonal finite element model.** Proceedings of the Fifth CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operation, p. 139–148, 2002.

MATTOX, D., **Hard Coatings by PVD.** Plating and Surface Finishing, Vol. 82, p. 48-49, 1995.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control.** John Willey and Sons, 1990

MONTGOMERY, D.C. **Design and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, Inc, 1997

OHNO, TAIICHI. **O sistema Toyota de Produção.** 2 ed., Bookman Editora, 1988.

PAUL, S., et al. **Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 116, p. 44-48, 2001.

PURUSHOTHAM, K. P., et al. **Tribological studies of Zr-implanted PVD TiN coatings deposited on stainless steel substrates.** Wear, Vol. 254, p. 589-596, 2003.

RUPPI, S. et al. **Wear characteristics of TiC, Ti(C,N), TiN and Al₂O₃ coatings in the turning of conventional and Ca-treated steels.** International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol. 16, p. 353-368, 1998.

SOKOVIC, M. et al. **Model of quality management of hard coatings on ceramic cutting tools.** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, p. 4207-4216, 2009.

SUMMA, H. P. **Schnittkraftmodell für das Drehschälen.** Doctor-Ingenieurs Dissertation. Universität Kaiserslautern, 1998.

SZUTKOWSKA, M. **Strengthening of hardmetal inserts for cutting tools through heat treatment and surface modifications (PVD, CVD coatings).** Journal of Materials Processing Technology, Vol. 92-93, p. 355-359, 1999.

TRENT, E. M. **Metal Cutting.** 3^a edição, Butterworth-Heinemann, 1991.

TRENT, E. M. **Metal Cutting.** 1^a edição, Butterworth-Heinemann, 1985.

UMBRELLO, D. et al. **On the evaluation of the global heat transfer coefficient in cutting.** International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 47, p. 1738-1743, 2007.

WANIGARATHNE, P. C., et al. **Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature.** Wear, Vol. 259, p. 1215-1224, 2005.

WEBSTER, J. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, p. 205-218, 1995.