

EDUARDO CARLOS BIANCHI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DISCOS
ABRASIVOS, EM OPERAÇÕES DO TIPO “CUT-
OFF” POR MERGULHO BASCULANTE, SUBME-
TIDOS A DIVERSAS CONDIÇÕES DE CORTE
SEM LUBRIFICAÇÃO**

EDUARDO CARLOS BIANCHI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DISCOS
ABRASIVOS, EM OPERAÇÕES DO TIPO
“CUT-OFF” POR MERGULHO BASCULANTE,
SUBMETIDOS A DIVERSAS CONDIÇÕES DE
CORTE SEM LUBRIFICAÇÃO**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia
Mecânica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia
da UNESP, para obtenção do título de Livre-
Docência.

BAURU

1997

Ficha catalográfica elaborada por
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - Bauru

671.212
B472e

Bianchi, Eduardo Carlos

Estudo do comportamento de discos abrasivos, em operações do tipo "cut-off " por mergulho basculante, submetidos a diversas condições de corte sem lubrificação / Eduardo Carlos Bianchi. - Bauru, 1997.
131f.

Tese (Livre-docência) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia e Tecnologia.

1. Operação cut-off 2. Discos abrasivos 3. Condições de corte 4. Otimização 5. Corte abrasivo

EDUARDO CARLOS BIANCHI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE DISCOS ABRASIVOS,
EM OPERAÇÕES DO TIPO “CUT-OFF” POR MERGULHO
BASCULANTE, SUBMETIDOS A DIVERSAS CONDIÇÕES DE
CORTE SEM LUBRIFICAÇÃO**

COMISSÃO JULGADORA

TESE PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE LIVRE-DOCENTE

Presidente: Prof. Adj. João Candido Fernandes (UNESP - Bauru)
2º Examinador: Prof. Tit. João Fernando Gomes de Oliveira (USP - EESC)
3º Examinador: Prof. Tit. Rosalvo Tiago Ruffino (USP - EESC)
4º Examinador: Prof. Tit. Nivaldo Lemos Coopini (UNICAMP - Campinas)
5º Examinador: Prof. Adj. Odilson Coimbra Fernandes (UNESP - Bauru /
USP - EESC)

Bauru, novembro de 1997

DADOS CURRICULARES
EDUARDO CARLOS BIANCHI

NASCIMENTO	20.08.1959 - SÃO CARLOS / SP
FILIAÇÃO	Antonio Bianchi Ilda Ianoni Bianchi
1979 / 1986	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade de Bauru (encampada pela UNESP em 1988)
1982 / 1987	Professor de ginásio e colegial de matemática, química e física do Colégio Prevê - Objetivo de Bauru
1987 / 1989	Professor do Departamento de Métodos e Processos, da Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP
1987 / 1990	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Escola de Engenharia de São Carlos - USP
1988 / 1990	Professor Auxiliar de Ensino (MS-1) do Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP
1990 / 1992	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Escola de Engenharia de São Carlos - USP
1990 / 1992	Professor Assistente (MS-2) do Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP

- 1992 / 1997 Professor Assistente Doutor (MS-3) do Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP
- 1995 Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, na Faculdade de Engenharia e Tecnologia - UNESP

Dedico integralmente este trabalho e todo esforço para realizá-lo, com amor e carinho, a minha filhinha **Ana Carolina Bianchi** e a minha esposa e amiga **Ana Rita Rodrigues Bianchi** por ter sido sempre atenciosa, compreensiva, amável, dentre outros fatos particulares de grande relevância na minha vida. Somente com seu apoio constante é possível a minha realização pessoal e profissional, mesmo com as dificuldades encontradas. Tudo que faço é com amor, carinho e muita felicidade por tê-las sempre ao meu lado.

Agradecimentos

Desejamos manifestar nossos agradecimentos a todas as pessoas e instituições envolvidas direta ou indiretamente na realização deste trabalho, pelos relevantes auxílios prestados.

Aos professores Dr. Ivan De Domenico Valarelli, Diretor da Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica, Dr. Yukio Kobayashi, Vice-Chefe do Departamento de Engenharia Mecânica, e Dr. Célio Losnak, Responsável pela Oficina Mecânica, pelo apoio, compreensão, paciência, amizade e disponibilidade em prestar os auxílios fundamentais nas ocasiões necessárias, sempre com incentivo e estando atentos ao desenvolvimento do projeto de pesquisa.

Ao professor Dr. Odilson Coimbra Fernandes, pela sincera amizade, companheirismo e pelo seu empenho pessoal para que esse trabalho pudesse ser realizado.

Ao professor M.Sc. Paulo Roberto de Aguiar, do Departamento de Engenharia Elétrica da UNESP - Bauru, pelo desenvolvimento do circuito eletrônico que viabilizou as medições de força tangencial de corte. Durante nosso bom relacionamento aos longo de vários anos, foi sempre amigo, atencioso e prestativo, nunca deixando de solucionar ou explicar alguma dúvida que surgisse.

Ao professor Dr. João Candido Fernandes, do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP - Bauru, pela medição do nível de ruído no corte de materiais com discos abrasivos, pelo constante incentivo e pela disponibilidade em apresentar suas valiosas sugestões, que foram além deste trabalho.

Aos professores e amigos Dr. César Antunes de Freitas, da Faculdade de Odontologia de Bauru, e Dr. Juarez Felipe Júnior, pela revisão e valiosas sugestões que muito colaboraram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rubens Carneiro Ubanere pelo apoio amigo, incentivo e excelentes sugestões.

Ao professor M.Sc. Vicente Luiz Scalon, pela amizade e apoio constante nas questões computacionais.

As alunos de graduação em engenharia mecânica Eduardo Martins de Castro e Adriano Cagnin que auxiliaram na revisão bibliográfica, montagem do banco de ensaios, desenvolvimento “software”, realização dos ensaios e redação do trabalho. Mesmo nas situações mais adversas estes estavam sempre presentes, atuantes e motivados. As atividades foram realizadas de forma plenamente satisfatória e num ambiente agradável, amigo e solidariedade recíproca.

A doutoranda da Faculdade de Odontologia de Bauru, Ana Rita Rodrigues Bianchi, pela colaboração e auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa, em especial pelas fotos tiradas dos cavacos.

Aos técnicos de laboratório Edson Roberto Rondon, Milton Mogioni e Carlos Furlaneto pela valiosa colaboração na construção da parte mecânica do banco de ensaios.

Ao técnico de laboratório Osmar Luis Martinelli, pela montagem do circuito eletrônico e pela constante disponibilidade na solução das necessidades eletro-eletrônicas do Laboratório de Usinagem por Abrasão.

Aos meus familiares, pela compreensão e estímulo para vencer os desafios apresentados.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro que viabilizou a maior parte da realização deste trabalho e pelas bolsas de Iniciação Científica concedidas.

A FUNDUNESP (Fundação Para o Desenvolvimento da UNESP) pelo apoio financeiro que complementou o financiamento do CNPq. Esta complementação financeira foi fundamental para a viabilização deste trabalho, num momento em que as dificuldades econômicas eram, aparentemente, intransponíveis. Assim, através de uma atitude inteligente, por

parte dos dirigentes da FUNDUNESP, foi possível a concretização de uma pesquisa nacional, vinculada uma empresa nacional.

À empresa NORTON S.A, em especial ao Engenheiro Sérgio Mitsuyoshi Nakamura, que gentilmente cedeu os discos abrasivos e informações técnicas específicas, participando das discussões que visavam o aperfeiçoamento do trabalho.

À empresa KOHLBACH pela doação dos motores utilizados na realização desse trabalho.

A Faculdade de Odontologia de Bauru (FOB), em especial ao Departamento de Materiais Dentários, pelo ambiente de amizade e respeito que possibilitou a complementação deste trabalho, e de outros que são desenvolvidos em conjunto, através das facilidades oferecidas para a utilização de todos os recursos disponíveis. De forma particular agradeço o professor Dr. Cesar Antunes de Freitas pelas fotos adicionais tiradas e pelas longas horas de discussões a respeito deste trabalho e dos resultados obtidos.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica, pelo empréstimo de diversos aparelhos eletrônicos utilizados para o desenvolvimento do circuito eletrônico da parte elétrica adicional.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

A Deus, a quem agradeço todos os dias, pela vida e pelas diversas oportunidades que me são constantemente oferecidas para o meu crescimento espiritual e humano, e por tudo que tenho recebido.

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	v
Lista de tabelas.....	ix
Lista de símbolos.....	x
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiii
1 - INTRODUÇÃO.....	01
2 - CONCEITOS SOBRE DISCOS ABRASIVOS, UTILIZAÇÃO E SEGURANÇA.....	06
2.1 - Características dos discos abrasivos.....	06
2.1.1 - Grãos abrasivos utilizados na fabricação de discos abrasivos.....	06
2.1.2 - Ligantes utilizados na fabricação de discos abrasivos.....	08
2.1.3 - Características dos discos abrasivos e sua operacionalidade.....	09
2.2 - Utilização dos discos abrasivos no meio industrial e em pesquisas.....	14
2.2.1 - Análise do efeito da operação de corte com discos abrasivos na superfície de diferentes materiais.....	15
2.2.2 - Discos abrasivos, do tipo desbaste, utilizados em fundições.....	17
2.2.3 - Discos abrasivos utilizados para o corte de placas e chapas de elevada resistência ao desgaste.....	17
2.2.4 - Análise do desgaste de discos abrasivos em operações do tipo “cut-off” e os métodos para aumentar suas vidas.....	19
2.2.5 - Análise do tempo de corte com discos abrasivos pelo controle da velocidade de corte.....	24
2.3 - A segurança do trabalho na utilização de discos abrasivos.....	24
2.3.1 - Poluição sonora - ruído.....	25
2.3.1.1 - Atenuação da poluição sonora.....	29
2.3.2 - Poluição do ar - toxicologia.....	31
2.3.2.1 - Diluição e controle de partículas emitidas.....	33
2.3.3 - Precauções de acidentes.....	35

2.3.3.1 - Proteções dos operadores	35
2.3.3.2 - Proteções na máquina	36
2.4 - Aspectos qualitativos dos discos abrasivos que influem na segurança	41
2.4.1 - Segurança e qualidade na fabricação de discos abrasivos	42
2.4.2 - Esforços atuantes sobre os discos abrasivos	42
2.4.3 - Responsabilidade do fabricante de produtos abrasivos	44
2.4.4 - Responsabilidade dos usuários	44
3 - FENOMENOLOGIA DO CORTE COM DISCOS ABRASIVOS	46
3.1 - Mecanismos de desgaste em discos abrasivos	46
3.2 - Parâmetros relacionados ao processo de corte com discos abrasivos	48
3.2.1 - Influência da velocidade de mergulho do disco abrasivo no material v_f	49
3.2.2 - Influência da velocidade de corte do disco abrasivo v_s	50
3.2.3 - Influência do comprimento de contato no corte com disco abrasivo l_c	50
3.2.4 - Influência do ângulo de penetração do grão abrasivo na peça h	52
3.3 - Equacionamento do processo de corte com discos abrasivos por mergulho basculante	57
4 - DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO	61
4.1 - Metodologia	61
4.2 - Grandezas de entrada, saída e do sistema	62
5 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA EXPERIMENTAÇÃO	63
5.1 - Descrição do banco de ensaios	63
5.1.1 - Parte eletrônica	63
5.1.2 - Parte computacional	66
5.1.3 - Parte mecânica	69
5.2 - Ensaios preliminares	82
5.3 - Escolha dos materiais e discos abrasivos utilizados	86

5.4 - Definições dos ensaios	87
5.5 - Cuidados tomados para a minimização de erros.....	89
5.6 - Ciclo dos ensaios	90
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
6.1 - Análise da geometria dos cavacos arrancados na operação de corte com disco abrasivos	92
6.1.1 - Geometria dos cavacos arrancados no corte do aço ABNT 1020, em função da velocidade de mergulho e da velocidade de corte.....	93
6.1.1.1 - Cavacos do aço ABNT 1020, com v_f variável e v_s constante	93
6.1.1.2 - Cavacos do aço ABNT 1020, com v_f variável e v_s decrescente.....	95
6.1.2 - Geometria dos cavacos arrancados no corte do aço ABNT 1045, em função da velocidade de mergulho e da velocidade de corte.....	98
6.1.2.1 - Cavacos do aço ABNT 1045, com v_f variável e v_s constante	98
6.1.2.2 - Cavacos do aço ABNT 1045, com v_f variável e v_s decrescente.....	100
6.1.3 - Considerações gerais sobre as geometrias dos cavacos arrancados.....	102
6.2 - Resultados obtidos de força tangencial de corte média em função do volume de material removido.....	102
6.2.1 - Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente no aço ABNT 1020	103
6.2.2 - Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente no aço ABNT 1045	105
6.3 - Influência da velocidade de mergulho no número e no tempo de corte.....	107
6.3.1 - Resultados com o aço ABNT 1020	107
6.3.2 - Resultados com o aço ABNT 1045.....	110
6.3.3 - Considerações gerais sobre a influência da velocidade de mergulho.....	111
6.4 - Influência da velocidade de mergulho na relação entre o volume de disco a- brasivo gasto/tempo de corte (v_s/t_c)	112
6.4.1 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo, no aço ABNT 1020	112

6.4.2 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo, no aço ABNT 1045.....	113
6.5 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do material (V_w/t_c).....	114
6.5.1 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do aço ABNT 1020.....	115
6.5.2 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do aço ABNT 1045.....	116
6.6 - Resultados da relação G	117
6.6.1 - Influência de v_f na relação G , para o aço ABNT 1020.....	117
6.6.2 - Influência de v_f na relação G , para o aço ABNT 1045.....	119
6.7 - Influência da velocidade de mergulho na força tangencial de corte média final.....	121
6.8 - Influência da velocidade de mergulho no custo do corte por unidade de volume de material removido.....	122
7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
BIBLIOGRAFIA CITADA.....	129
ANEXO 1: Resultado típico de um ensaio.....	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Pesquisa realizada por Di Giácomo	01
Figura 2.1: Diversos exemplos de seções metálicas de diferentes formas, cortadas pelo processo de corte por disco abrasivo	15
Figura 2.2: Dependência do diâmetro de discos abrasivos de ligante de baquelite pelo número de cortes calculados.....	20
Figura 2.3: Fixador de peça para corte de barras redondas ou quadradas, apoiadas em blocos em “V” com alinhadores em aço temperado.....	40
Figura 3.1: Formas de ocorrência do macro desgaste e desgaste térmico da superfície de corte dos discos abrasivos.....	47
Figura 3.2: Influência da velocidade de mergulho v_f na espessura do cavaco arrancado	49
Figura 3.3: Forma esquemática da variação do comprimento de contato para o corte de seções circulares.....	51
Figura 3.4: Modificações no ângulo η quando a velocidade de corte é constante e a velocidade de mergulho variável.....	53
Figura 3.5: Modificações no ângulo η quando a velocidade de corte é decrescente e a velocidade de mergulho é variável.....	54
Figura 3.6: Esquema da remoção de materiais para pequenos e grandes ângulos de penetração.....	55
Figura 3.7: Trajetória da ponta do grão abrasivo e a formação do cavaco na forma esférica.....	56
Figura 3.8: Fenomenologia de corte para operações tipo “cut-off”	57
Figura 5.1: Fotografia do circuito eletrônico.....	64
Figura 5.2: Esquema do conjunto “encoder” - disco metálico ranhurado.....	66
Figura 5.3: Esquema da parte elétrica do banco de ensaios.....	71
Figura 5.4: Vista lateral da estrutura mecânica (níveis).....	73
Figura 5.5: Detalhe da polia do cabeçote e transmissão.....	74
Figura 5.6: Detalhe do tambor, cabo de aço, contrapeso e motores.....	75
Figura 5.7: Esquema de transmissão das polias dos eixos dos níveis 3 e 4.....	77
Figura 5.8: Detalhe da máquina de corte e espaço de trabalho.....	80

Figura 5.9: Composição geral da estrutura.....	81
Figura 5.10: Banco de ensaios protegido.....	82
Figura 5.11: Resultados do primeiro ensaio preliminar para a verificação do funcionamento do “software”.....	83
Figura 5.12: Resultados do segundo ensaio preliminar para a verificação do funcionamento do “software”.....	84
Figura 5.13: Fotografia mostrando as alteração realizadas.....	85
Figura 5.14: Dimensões principais do disco abrasivo utilizado (sem escala).....	87
Figura 6.1: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	94
Figura 6.2: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	94
Figura 6.3: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	95
Figura 6.4: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.....	96
Figura 6.5: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.....	97
Figura 6.6: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.....	97
Figura 6.7: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	98
Figura 6.8: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	99
Figura 6.9: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.....	99
Figura 6.10: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.....	100
Figura 6.11: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e	

$v_{si} = 70,0 \text{ m/s}$	101
Figura 6.12: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6 \text{ mm/s}$ e	
$v_{si} = 70,0 \text{ m/s}$	101
Figura 6.13: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante	113
Figura 6.14: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte decrescente	104
Figura 6.15: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante	106
Figura 6.16: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte decrescente	106
Figura 6.17: Resultados da influência da velocidade de mergulho no número de cortes para o aço ABNT 1020	108
Figura 6.18: Resultados da influência da velocidade de mergulho no tempo de corte para o aço ABNT 1020	108
Figura 6.19: Resultados da influência da velocidade de mergulho no número de cortes para o aço ABNT 1045	110
Figura 6.20: Resultados da influência da velocidade de mergulho no tempo de corte para o aço ABNT 1045	111
Figura 6.21: Resultados obtidos de taxa de desgaste volumétrico do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1020	113
Figura 6.22: Resultados obtidos de taxa de desgaste do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1045	114
Figura 6.23: Resultados obtidos da taxa de remoção volumétrica do material, para todos os ensaios com o aço ABNT 1020, em função da velocidade de mergulho	115
Figura 6.24: Resultados obtidos da taxa de remoção volumétrica do material, para todos os ensaios com o aço ABNT 1045, em função da velocidade de mergulho	116
Figura 6.25: Resultados de relação G , em função da velocidade v_f e das duas condições e velocidade de corte, para o aço ABNT 1020	117

Figura 6.26: Resultados da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados, em função de v_f , para o aço ABNT 1020.....	118
Figura 6.27: Resultados de relação G, em função da velocidade v_f e das duas condições da velocidade de corte, para o aço ABNT 1045.....	119
Figura 6.28: Resultados da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados, em função de v_f , para o aço ABNT 1045.....	120
Figura 6.29: Resultados dos valores de força tangencial de corte média final em função de v_f , no aço ABNT 1020.....	121
Figura 6.30: Resultados dos valores de força tangencial de corte média final em função de v_f , no aço ABNT 1045.....	122
Figura 6.31: Resultados do custo do corte por unidade de volume de material removido, em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1020.....	124
Figura 6.32: Resultados do custo do corte por unidade de volume de material removido, em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1045.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Movimento Geral das Estatísticas do Setor de Abrasivos de 1996 (SI-NAESP).....	02
Tabela 2.1: Valores indicados de espessura dos discos abrasivos em relação ao seu diâmetro externo.....	11
Tabela 2.2: Cuidados para a utilização de discos abrasivos.....	13
Tabela 2.3: Dados técnicos dos discos abrasivos de baquelite e resultados dos coeficientes cinéticos calculados.....	21
Tabela 2.4: Relação entre o nível de ruído (dB(A)) emitido e a máxima exposição diária permissível.....	28
Tabela 2.5: Comparação entre protetores tipo conchas e tampões.....	31
Tabela 5.1: Estrutura e sequenciamento dos ensaios.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

A - área de contato entre o disco abrasivo e o material	[mm ²]
a - coeficiente adimensional	[--]
b' - coeficiente adimensional	[--]
b - largura média do topo dos grãos abrasivos	[mm]
C - número de grãos abrasivos por unidade de área	[nº/mm ²]
C_q - coeficiente para uma taxa de desgaste	[--]
d - diâmetro do furo do disco abrasivo	[mm]
d_s - diâmetro externo do disco abrasivo	[mm]
d_c - diâmetro da peça a ser cortada	[mm]
D_f - diâmetro externo final do disco abrasivo	[mm]
D_o - diâmetro externo inicial do disco abrasivo	[mm]
F_{tcm} - força tangencial de corte média	[N]
F_{tciv} - força tangencial de corte instantânea em vazio	[N]
F_{tcv} - força tangencial em vazio	[N]
F_{tcmv} - força tangencial de corte média em vazio	[N]
F_{tcti} - força tangencial de corte total instantânea	[N]
F_{tci} - força tangencial de corte instantânea	[N]
F_{tc} - força tangencial de corte	[N]
F_{tc1g} - força tangencial de corte num grão abrasivo	[N]
G - relação entre V_w e V_s	[--]
h_{eq} - espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max} - espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
K_s - pressão específica de corte	[N/mm ²]
K_n - tensão de escoamento do metal da peça	[N/mm ²]
l - largura do disco abrasivo	[mm]
l_c - comprimento de contato	[mm]
L - espaçamento médio entre os grãos abrasivos	[mm]

m - multiplicador logarítmico	[--]
N_c - número de cortes até o limite máximo do desgaste do disco abrasivo	[--]
n - rotação instantânea do disco abrasivo	[rad/s]
N - número de cavacos arrancados por unidade de tempo	[nº/s]
P_e - potência elétrica	[W]
Q_w - taxa de remoção de material no tempo	[mm ³ /s]
Q_w' - taxa de remoção específica de material no tempo	[mm ³ /mm.s]
Q_a - taxa de desgaste volumétrica	[mm ³ /s]
t_c - tempo de corte	[s]
t' - espessura do cavaco na região de deformação elástica	[mm]
t - espessura do cavaco na região de formação	[mm]
v_s - velocidade de corte constante	[m/s]
v_{si} - velocidade de corte decrescente	[m/s]
v_f - velocidade de mergulho do disco abrasivo na peça	[m/s]
V_w - volume de material removido	[mm ³]
V_s - volume de disco abrasivo gasto	[mm ³]
V_s/t_c - taxa de desgaste volumétrico do disco abrasivo	[mm ³ /s]
V_w/t_c - taxa de desgaste volumétrico do material	[mm ³ /s]
h - ângulo com que os grãos abrasivos penetram na peça	[rad]
d - penetração do disco abrasivo no material	[mm]
m - coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e a peça	[--]

Resumo

O corte de aços por disco abrasivo é um dos processos que apresentam as melhores características de economia, eficiência e rapidez, e ainda hoje é muito utilizado no meio industrial se comparado a outros processos tradicionais de corte como o cisalhamento (tesourão), torneamento (sangramento), serragem com serras metálicas, serragem por atrito com lâminas circulares sem dentes e chama oxi-acetileno.

Da literatura formal mais recente, nota-se que durante os últimos anos as máquinas para a realização dos cortes foram inovadas. Entretanto, esta atenção não foi dada à ferramenta de corte abrasiva.

A falta de literatura técnica dificulta a escolha das condições de corte e da sua otimização no meio industrial. Este fato é agravado pela grande diversidade de discos abrasivos disponíveis no mercado, com diferentes qualidades e preço.

As decisões sobre as condições de corte são baseadas em experiências pessoais, sem critério definido, e freqüentemente desprezam os aspectos de segurança inerentes ao processo.

A concorrência estrangeira, através da globalização da economia, está obrigando as indústrias nacionais a atenderem os padrões internacionais de qualidade e desempenho. Uma forma das indústrias nacionais tornarem-se mais competitivas é através do conhecimento detalhado das operações de corte com discos abrasivos.

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre o comportamento de discos abrasivos, submetidos a diversas condições de corte. Os resultados são discutidos em função da análise da velocidade de corte, velocidade de mergulho do disco abrasivo na peça, força tangencial de corte média, tempo de corte e relação G .

Abstract

The cut-off operation shows the best savings, efficiency and quickness characteristics and nowadays it is very used in the industrial environments if compared to other traditional cutting operations like shearing, turning, sawing with metallic hacksaws, friction sawing with non-tooth circular blades and oxi-acetylene torch cutting.

In the most recent bibliography, it is noted that the new cutting machines have been improved. However, this fact did not happen in the abrasive cut-off tools.

The lack of technical bibliography led the cutting conditions and optimizations choices to be a hard action. Such difficulties are worsen because there are many kinds of abrasive cutting wheels available with different qualities and prices.

So, these choices are based on personal experiences, without parameters, and frequently despise the security aspects of the operations.

The foreign competition, through the economy globalization, is forcing the national industry to attend the international quality and performance standards. One way for the national industries become more competitiveness (improving the productivity and decreasing the production costs) it is by the detailed knowledgment of the cut-off operations with abrasive wheels.

This work shows a research about the abrasive wheels behavior, under several cutting conditions. The results are discussed in function of the cutting speed, downfeed of the abrasive wheel, average of tangencial cutting force, time per cut and **G** parameter analysis.

1 – INTRODUÇÃO

O corte de materiais por disco abrasivo ou “cut-off” (termo mais comumente usado) é um dos processos que apresentam as melhores características de economia, eficiência e rapidez, e ainda hoje é muito utilizado no meio industrial.

Segundo Rastetter (1993), neste processo de corte um disco abrasivo, constituído de grãos com formas geométricas aleatórias e unidos por ligante, removem pequenos cavacos da peça até que esta seja completamente seccionada. Ao longo dos cortes, os grãos abrasivos podem tornarem-se cegos (pelo desgaste das arestas de corte no topo dos grãos abrasivos), fraturarem-se ou desprenderem-se da superfície de corte (ativa) do disco abrasivo, por auto-afiação, onde são substituídos por grãos novos e afiados.

Di Giácomo (1988), após um amplo levantamento bibliográfico feito a partir de trabalhos publicados no "Bulletin of Japan Society of Precision Engineering", constatou a grande corrida internacional, principalmente na Alemanha e Japão, pelas pesquisas relacionadas aos processos abrasivos, conforme é apresentado na figura 1.1.

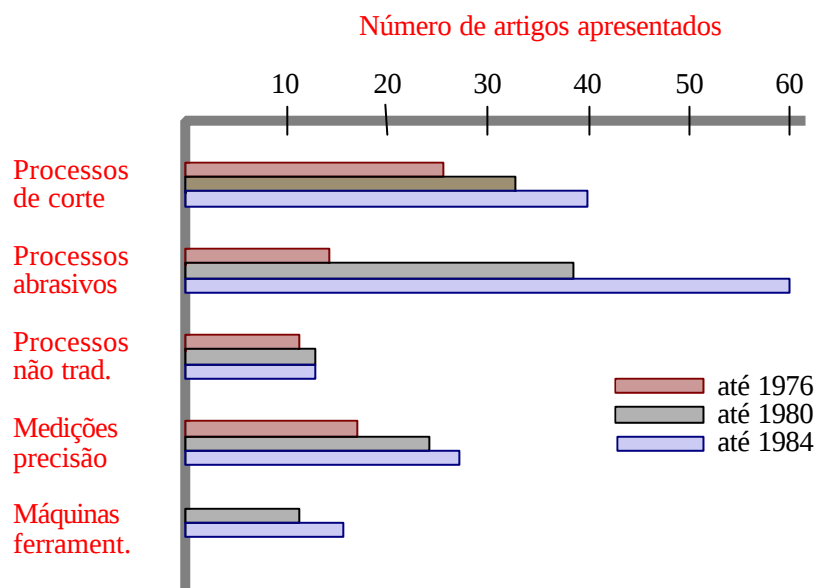


Figura 1.1: Pesquisa realizada por Di Giácomo (1988).

Nesta figura constata-se que o número de trabalhos publicados até 1984 sobre processos abrasivos passou a ser o dobro dos trabalhos relacionados aos processos de corte convencionais com ferramentas de geometria definida. Deve-se salientar que nesta pesquisa foi

dada ênfase aos processos de retificação; porém, trata-se de uma pesquisa que retrata o desenvolvimento de trabalhos científicos sobre processos abrasivos. No caso do processo de corte com disco abrasivo, a situação é ainda mais crítica se comparada aos processos de retificação, mesmo sendo este um dos processos mais utilizados no meio industrial para o corte de materiais.

Da literatura formal mais recente, nota-se que durante os últimos anos foram desenvolvidos diversos tipos e modelos de máquinas que realizam cortes com boa precisão dimensional, de acordo com as necessidades de aplicação e com as características desejadas para o processo. Entretanto, o tratamento dado aos discos abrasivos é precário.

Através de consulta realizada a uma empresa nacional, constatou-se que o número aproximado de unidades de discos abrasivos fabricadas no ano de 1996 foi de 9.363.787.

Segundo o SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ABRASIVOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINAESP, 1997) o movimento geral das estatísticas deste setor em 1996 pode ser observado na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Movimento Geral das Estatísticas do Setor de Abrasivos de 1996
(SINAESP, 1997).

ABRASIVOS AGLOMERADOS - REBOLOS				
TIPOS	Venda Nacional (kg)	Exportação (kg)	Venda Nacional (R\$)	Exportação (R\$)
VITRIFICADOS				
A) Rebolos em geral	3.240.686	1.295.250	31.863.802	4.428.672
B) Pontas Montadas outras espécies	690.800	247.068	3.822.695	1.069.333
RESINÓIDE				
A) Rebolos em Geral	2.854.950	103.650	20.286.026	1.578.122
B) Discos Abrasivos (corte e desbaste)	5.085.257	739.342	28.102.902	4.312.222
Borrachas	64.358	13.713	1.112.515	55.140
Outras Ligas	15.653	3.106	282.209	21.554
TOTAIS	11.951.704	2.402.129	85.550.149	11.465.045

Trata-se, portanto, de uma ferramenta abrasiva de corte que é produzida e utilizada em grandes quantidades. Entretanto, há carência de pesquisas científicas nas instituições nacionais abordando este setor, que poderiam fornecer informações tecnológicas para a utilização dos discos abrasivos de forma mais adequada.

O segredo para a utilização de discos abrasivos está em quando e como utilizá-los para o corte de um determinado material. Isto pode ser quantificado pela análise do volume de material que é removido, tempo de corte, desgaste diametral do disco abrasivo, temperatura na região de corte, dentre outros (Snee, 1991).

A falta de literatura técnica específica, desenvolvida com critério científico, sobre este assunto agrava a escolha das condições de corte, tornando difícil a sua otimização em função do tipo de disco abrasivo, material a ser cortado e condições de corte. Isto é agravado pelo fato de atualmente os discos abrasivos estarem disponíveis em todos os níveis de qualidade e preço.

Segundo Bianchi et al. (1996), estas dificuldades fazem com que os critérios para utilização de discos abrasivos no meio industrial não estejam devidamente estabelecidos como na usinagem com ferramentas de arestas cortantes de geometria definida. Assim, os usuários utilizam discos abrasivos baseados em experiências pessoais, sem critério definido, e freqüentemente desprezam os aspectos de segurança inerentes ao processo.

O comportamento da operação de corte com discos abrasivos depende do material a ser cortado, dos discos abrasivos utilizados, da habilidade e sensibilidade do operador e das condições de corte que são empregadas. Deve-se ressaltar que as condições de corte não podem ser otimizadas variando-se apenas um dos parâmetros de entrada do processo, mas através de uma combinação elaborada entre estes.

Numa típica oficina, para a execução da mais simples operação de corte, pode-se utilizar milhares de discos abrasivos por ano. A escolha inadequada do disco abrasivo e das condições de corte e a falta de informações técnicas seguras podem resultar num custo por corte excessivamente elevado. Freqüentemente os discos abrasivos são adquiridos pensando-se apenas no preço de mercado, quando de fato o determinante mais importante é a eficiência de corte.

Este trabalho tem como objetivo estudar experimentalmente o comportamento de discos abrasivos, em operações do tipo “cut-off” por meio de mergulho basculante, submetidos a diferentes condições de corte. Pretende-se assim, fornecer informações técnicas consistentes aos usuários, deste processo de corte, para que possam utilizar de forma tecnicamente mais adequada os discos abrasivos. Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados dois tipos de aço (ABNT 1020 e ABNT 1045) e um tipo de disco abrasivo (AR302). Os parâmetros de entrada utilizados para a realização dos ensaios foram: dois valores de velocidade de corte v_s [m/s] (uma constante v_s e outra decrescente v_{si}) e três valo-

res de velocidade de mergulho do disco abrasivo na peça v_f [m/s]. As variáveis de saída utilizadas foram: força tangencial de corte média F_{tcm} [N], tempo de corte t_c [s] e relação G .

Para alcançar este objetivo, a estrutura dos próximos capítulos foi elaborada da seguinte forma:

- Capítulo 2 - CONCEITOS SOBRE DISCOS ABRASIVOS, UTILIZAÇÃO E SEGURANÇA: Neste capítulo são apresentados conceitos sobre as características dos discos abrasivos, utilização no meio industrial e em pesquisas, segurança do trabalho na utilização, aspectos qualitativos que influem na segurança, esforços atuantes sobre os discos e responsabilidade dos fabricantes e dos usuários.
- Capítulo 3 - FENOMENOLOGIA DO CORTE COM DISCOS ABRASIVOS: Apresenta os mecanismos de desgaste em discos abrasivos, parâmetros relacionados ao processo de corte, influência da velocidade de penetração do disco abrasivo no material, influência da velocidade de corte, influência do comprimento de contato no corte, influência do ângulo de penetração do grão abrasivo na peça e equacionamento do processo de corte com discos abrasivos por mergulho basculante.
- Capítulo 4 DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO: Apresenta as etapas realizadas e as grandezas de entrada, de saída e do sistema.
- Capítulo 5 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA EXPERIMENTAÇÃO: Apresenta a descrição do banco de ensaios (parte eletrônica, parte computacional e parte mecânica), ensaios preliminares, escolha dos materiais e discos abrasivos utilizados, definições dos ensaios, cuidados tomados para a minimização de erros e o ciclo de realização de ensaios.
- Capítulo 6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO: É feita uma análise global da geometria dos cavacos arrancados na operação de corte com discos abrasivos, são discutidos os resultados obtidos de força tangencial de corte média em função do volume de material removido, é discutida a influência da velocidade de mergulho no número e no tempo de corte, a influência da velocidade de mergulho na relação entre o volume de disco abra-

sivo gasto/tempo de corte (Vs/t_c), a influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do material (Vw/t_c), os resultados da relação G , a influência da velocidade de mergulho na força tangencial de corte média final e a influência da velocidade de mergulho no custo do corte por unidade de volume de material removido.

- Capítulo 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS: São apresentadas as conclusões relativas a este trabalho e as sugestões para futuros trabalhos que venham a abordar os temas relacionados ao processo de corte por disco abrasivo.

2 - CONCEITOS SOBRE DISCOS ABRASIVOS, UTILIZAÇÃO E SEGURANÇA

A exemplo do que ocorre no processo de retificação, o número de variáveis que influenciam no processo de corte por discos abrasivos é grande e estas influem diretamente no seu desempenho.

Trata-se de uma ferramenta abrasiva que permite elevadas taxas de remoção de material, através de cortes relativamente contínuos. Segundo Farago (1980), seu desempenho está relacionado às elevadas velocidades de corte, geralmente na faixa de 50 a 80 m/s, e velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre o material.

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre discos abrasivos, tendo como enfoque principal os materiais empregados na sua fabricação, aplicações principais, insalubridade do processo de corte por discos abrasivos e cuidados para a sua utilização adequada.

Por se tratar de um assunto pouco explorado cientificamente e por ser o primeiro a ser desenvolvido no país, de acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, foram inseridas algumas particularidades adicionais.

2.1 - Características dos discos abrasivos

Segundo Nussbaum & Dicastilho (1988), discos abrasivos são rebolos de pouca espessura utilizados para o corte de materiais com diferentes formas geométricas, com rapidez, baixo custo e alta qualidade em relação a outros processos de corte. Segundo Luther (1995), os discos abrasivos consistem de três elementos principais: o grão abrasivo, o ligante e a sua porosidade.

2.1.1 - Grãos abrasivos utilizados na fabricação de discos abrasivos

Ainda segundo Nussbaum & Dicastilho (1988), os tipos de grãos abrasivos convencionais utilizados na fabricação de discos abrasivos são:

- Óxido de alumínio: é o grão abrasivo mais utilizado em discos abrasivos fabricados para o corte de aços, aços-liga, ferro fundido nodular e ferro fundido maleável;
- Carbetto de silício: utilizado para o corte de ferro fundido, materiais não-metálicos e alguns tipos de materiais ligados e não-metais tais como cerâmicas e concreto;
- Composição de zircônio e óxido de alumínio: é recomendada para aplicações onde o corte de metais deve gerar uma superfície com acabamento polido, para fins de análise metalográfica. Proporcionam maior durabilidade do que os demais tipos de grãos abrasivos, cerca de 4 a 8 vezes maior, pela menor geração de calor na região de contato (Snee, 1991). Discos abrasivos fabricados com grãos de zircônia-alumina, para desbaste de fundição, proporcionam a melhoria da capacidade produtiva, mais do que os tradicionais grãos abrasivos de óxido de alumínio e carbeto de silício. São mais tenazes que o óxido de alumínio, sendo melhor para o corte de aço inoxidável e superligas, incluindo fundidos de super-ligas de base de níquel.
- Zircônia: é utilizada para a fabricação de discos abrasivos destinados a máquinas de rebarbação de bancada e máquinas com discos abrasivos oscilantes.

Os tipos de grãos superabrasivos utilizados na fabricação de discos abrasivos são:

- Nitreto de boro cúbico (CBN): o desenvolvimento mais novo dos grãos abrasivos é o nitreto de boro cúbico. Estes são mais duráveis e aplicáveis particularmente para aços-liga e aplicações precisas de desbaste.
- Diamante: os grãos diamantados são utilizados para a fabricação dos discos abrasivos para o corte de materiais não metálicos. A aplicação do disco abrasivo diamantado é particularmente usual em materiais frágeis, tais como: aços temperados, metais duros, superfícies com tratamento superficial (óxido, nitreto e carbeto) e cerâmicas. Se tais materiais forem seccionados por discos abrasivos convencionais, rapidamente a deformação crítica da rede cristalina da peça é excedida e as trincas e rachaduras desenvolvem-se. Os grãos superabrasivos não fazem parte do escopo deste trabalho, pelo fato de que é dada ênfase ao estudo de discos abrasivos convencionais.

As granulometrias utilizadas para a fabricação dos discos abrasivos convencionais variam de 12 a 210 mesh, dependendo das necessidades do corte, que pode ser desde uma rápida remoção de material até um corte gerando uma superfície polida e livre de rebarbas.

A capacidade de um grão abrasivo quebrar-se está associada à sua tenacidade. O conceito de tenacidade aplicado aos grãos abrasivos pode ser entendido como sendo a capacidade do grão abrasivo em suportar as tensões provocadas por impactos, sem fraturar-se e quebrar em pedaços. Assim, pode-se entender tenacidade como sendo a quantidade de trabalho necessário para quebrar um grão abrasivo, sob determinadas condições e esforços aplicados. Quanto maior o esforço aplicado para produzir a ruptura do grão abrasivo, maior a tenacidade do mesmo.

Na fabricação dos discos abrasivos, é comum a implementação de aditivos (tais como a perita que favorece a dissipação de calor, e a criolita que melhora a resistência mecânica do disco abrasivo, dentre outros) e reforços com uma ou mais telas, em função dos esforços laterais e da velocidade de corte a que são submetidos os discos abrasivos.

2.1.2 - Ligantes utilizados na fabricação de discos abrasivos

Para a seleção da dureza do ligante a ser utilizado na fabricação do disco abrasivo, deve-se considerar o tipo de aplicação. A opção por ligantes macios é indicada para o corte de materiais frágeis, corte com máquinas de baixa potência ou para discos abrasivos que realizam cortes com pequenas espessuras, pois o disco abrasivo permanece sempre agressivo; ou seja, com capacidade de corte pela renovação constante dos grãos abrasivos da sua superfície de corte. Neste caso a geração de calor é menor. A opção por ligantes duros é feita para o corte de materiais dúcteis ou com máquinas onde a peça apresenta movimento de rotação. Neste caso os discos abrasivos apresentam uma vida mais longa; ou seja desgastam-se menos e por isso removem mais material. A escala de dureza do ligante varia de G (macio) a Z (duro).

Dois tipos básicos de ligantes são preferencialmente utilizados na fabricação dos discos abrasivos. Estes são:

- Ligante resinóide: é utilizado na fabricação de discos abrasivos para cortes refrigerados ou secos. Um exemplo típico de aplicação são os discos abrasivos utilizados por serralheiros para o corte de perfis.
- Ligante de borracha: este tipo de ligante apresenta como características: a produção de superfícies com baixa rugosidade superficial, flexibilidade e resistência mecânica, e

permite cortes de precisão, mantendo o paralelismo entre as superfícies cortadas sem rebarbas. Têm os inconvenientes de gerar um odor característico de borracha queimada e de amolecer com pequenos aquecimentos, perdendo rendimento através da liberação de grãos abrasivos da superfície de corte dos discos com maior facilidade. Por estas razões, os cortes devem ser refrigerados. Quando são previstos esforços laterais, os discos abrasivos são reforçados por camadas de malha de fibra de vidro, moldadas dentro e/ou nas superfícies laterais dos discos abrasivos. Com isto minimiza-se as possibilidades de ruptura. Tais discos são usados com velocidades periféricas de 30 a 48 m/s (Farago, 1980). Com estes valores reduzidos de velocidade de corte, a dureza dinâmica do disco abrasivo é menor e prejudica o desempenho do corte refrigerado, em cerca da metade da conseguida nos processos a seco.

Outros dois tipos de ligante que também podem ser utilizados, porém em aplicações específicas, são:

- Ligante metálico: este tipo de ligante apresenta grande capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Assim é recomendado para aplicações onde sejam necessárias alta precisão e mínima perda da capacidade de corte do disco. Um exemplo da aplicação deste ligante é para o corte de materiais destinados à análise metalográfica, pois tais amostras são muito delgadas e precisas.
- Ligante vitrificado: apresentam elevada capacidade de retenção do grão abrasivo na superfície de corte do disco. Desse modo, as forças de corte tendem a se elevar, e consequentemente fraturam o disco abrasivo. Este tipo de ligante é utilizado, dentre outros, na fabricação de discos (rebolos delgados) para a abertura de canais em brocas helicoidais.

2.1.3 - Características dos discos abrasivos e sua operacionalidade

Segundo Snee (1991), os fatores que determinam a especificação dos discos abrasivos são: o tipo de máquina, material da peça, refrigeração, potência do motor de acionamento, fixação da peça e o diâmetro externo máximo do disco abrasivo.

Algumas características sobre o processo de corte com discos abrasivos devem ser conhecidas para que se possa fazer uma opção consciente sobre este processo de corte. Segundo Farago (1980), estas características são:

1. Maior área de material removido por unidade de tempo de corte. Esta relação pode ser 10 a 20 vezes maior no corte de materiais com discos abrasivos do que com os outros processos de corte por formação de cavaco. Como um exemplo, em operações sem refrigeração, um disco abrasivo consegue cortar $100 \text{ mm}^3/\text{mm}$ de material em cerca de 0,3 a 0,8 segundos.
2. Precisão dimensional do corte. A uniformidade da largura e a retilidade do entalhe são geralmente melhores em operações de corte com discos abrasivos do que em cortes executados com serras metálicas.
3. Superfície da peça e rebarbas. No corte com discos abrasivos a rugosidade superficial da peça é menor e com um mínimo de rebarbas. Assim, geralmente é desnecessária uma operação de acabamento subsequente.
4. Corte de materiais frágeis, tais como aço temperado e carbeto metálico podem ser executados por discos abrasivos. A operação de corte com discos abrasivos é amplamente utilizada no corte de materiais não-metálicos e frágeis.
5. Nenhuma manutenção da ferramenta (afiação) é requerida durante sua vida útil.
6. O custo da operação de corte com discos abrasivos é, na maioria das vezes, substancialmente menor do que os dos processos alternativos de seccionamento.
7. Aplicações relacionadas. Discos abrasivos são utilizados em operações relacionadas com o seccionamento de materiais, tais como rasgos estreitos, ranhuras em aços temperados ou peças não-metálicas de dureza elevada.

O diâmetro externo dos discos abrasivos é definido pela capacidade de remoção de material da máquina de corte, que geralmente especifica tal medida. Com respeito à espessura dos discos abrasivos, que variam de acordo com o diâmetro externo e a aplicação, os valores máximos de espessura para aplicações gerais são apresentados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores indicados de espessura dos discos abrasivos em relação ao seu diâmetro externo (Farago, 1980).

Diâmetro do disco abrasivo	Espessura máxima do disco abrasivo
até 150 mm (6 pol)	4,76 mm (3/16 pol)
de 150 a 300 mm (6 a 12 pol)	6,25 mm (1/4 pol)
de 300 a 585 mm (12 a 23 pol)	9,52 mm (3/8 pol)
maior do que 585 mm (23 pol)	12,7 mm (1/2 pol)

Discos abrasivos reforçados são fabricados para permitir velocidades de corte mais elevadas. A máxima velocidade de corte nem sempre representa um valor ótimo, pois este processo depende de diversos parâmetros que o envolvem. A escolha da velocidade de corte adequada pode ser determinada experimentalmente, sendo influenciada pelas condições de corte, capacidade do equipamento, tipo do material da peça, forma e dimensões da seção de corte. Deve-se ressaltar que quando utiliza-se elevadas velocidades de corte algumas precauções especiais quanto à segurança do operador são necessárias. Nunca se deve exceder o valor máximo recomendado pelo fabricante.

A escolha inadequada do disco abrasivo e das condições de corte comprometem a sua utilização, resultando em baixo rendimento e na possibilidade de quebra.

Segundo Farago (1980), o acompanhamento da operação de corte com discos abrasivos é uma maneira de se verificar a escolha adequada do disco e das condições de corte. A forma geométrica do desgaste da superfície de corte do disco pode ser um indicativo para a avaliação do processo. Quando devidamente escolhido e utilizado, a superfície de corte do disco abrasivo deve apresentar os seguintes formatos:

- extremidade arredondada quando cortar peças volumosas;
- extremidade reta em operações gerais de corte em peças de pequenos diâmetros, estruturas e canos de paredes médias;
- extremidade côncava quando cortar tubos e seções de paredes finas;

Quando a escolha do disco abrasivo ou das condições de corte são inadequadas, os formatos característicos da superfície de corte do disco abrasivo são:

- extremidades pontiagudas quando o disco abrasivo é muito duro para o trabalho;

- face quebrada da extremidade mostrando um desgaste assimétrico, causada por aplicação de esforços desiguais para cada um dos lados do disco abrasivo;
- brilho da superfície de corte e nas laterais resultam da utilização de discos abrasivos muito duros ou elevada velocidade de mergulho.

O corte de materiais por discos abrasivos pode ser feito a seco ou refrigerado. Para ambos os casos existem aplicações favoráveis. O corte a seco pode ser executado em equipamentos de baixo custo, que realizam operações de corte mais rapidamente. Os discos abrasivos usados em cortes a seco normalmente são fabricados com ligante resinóide. Este critério também pode ser usado quando a refrigeração não for usual ou desejável; porém, deve-se verificar se as condições de corte a seco são aceitas.

Segundo Farago (1980), por causa dos benefícios derivados do corte abrasivo a seco, uma ampla variação de máquinas para este fim são fabricadas, com diferentes capacidades de corte, de acordo com os seguintes limites máximos aproximados:

- para sólidos - até 200 mm x 200 mm ou circular com diâmetro de 200 mm;
- para formas estruturais - até 300 mm de comprimento linear;
- para tubos - até cerca de 300 mm de diâmetro externo.

Quando o acabamento da superfície cortada a seco for considerada inadequada pela presença de rebarbas, rugosidade elevada ou defeitos metalúrgicos (como descoloração ou têmpera), as condições de corte podem ser melhoradas utilizando-se discos abrasivos com grãos mais finos do que os comumente escolhidos e ligantes mais macios. Enquanto tais especificações reduzem o desempenho do corte e a vida útil do disco abrasivo, a melhoria do acabamento superficial da peça pode justificar tal escolha.

A aplicação do corte refrigerado requer máquinas equipadas com sistemas de circulação de refrigerante. Dissipando o calor gerado pela ação do disco abrasivo, a queima da peça é evitada, a sua rugosidade superficial é reduzida e há poucas ou nenhuma rebarba. O refrigerante utilizado é geralmente a água com adição de óleo solúvel e/ou inibidor químico de oxidação. Um suprimento abundante de refrigerante deve ser direcionado na área de seccionamento da peça e em quantidades iguais nos dois lados do disco abrasivo, para prevenir o desgaste desigual do mesmo, que pode comprometer a retilidade do corte. O corte

abrasivo refrigerado pode ser aplicado para cortar sólidos de até 300 mm, quadrados ou cilíndricos, e excepcionalmente, até maior.

O corte submerso é um método de corte abrasivo refrigerado que, mantendo a peça submersa durante o corte, proporciona a melhor condição de refrigeração, com os efeitos benéficos no acabamento superficial da peça e da superfície de corte do disco abrasivo. Este método é preferido para cortes de espécimes metalográficos.

Para a utilização de discos abrasivos, alguns cuidados básicos devem ser tomados para a obtenção do melhor rendimento do corte e segurança no trabalho. Estes cuidados são apresentados na tabela 2.2 (Snee, 1991).

Tabela 2.2: Cuidados para a utilização de discos abrasivos (Snee, 1991).

SIM	NÃO
1) sempre manipule e armazene os discos cuidadosamente.	1) utilize discos abrasivos rachados, que sofreram queda ou que estejam danificados.
2) inspecione visualmente todos os discos antes da montagem.	2) force o disco abrasivo contra a máquina ou altere o furo de montagem.
3) verifique se a rotação do motor excede a máxima de segurança impressa no disco abrasivo.	3) exceda a rotação máxima impressa na face do disco abrasivo.
4) verifique os flanges de montagem: eles devem ser iguais e com o diâmetro de, pelo menos, 1/4 do diâmetro do disco abrasivo.	4) utilize flanges de montagem cujas superfícies de apoio não se encontram iguais, limpas, planas e livre de rebarbas.
5) utilize fixadores de papel mata-borrão quando fornecidos com os discos abrasivos.	5) aperte a porca de montagem de forma excessiva.
6) prenda firmemente a peça quando utilizar discos não-reforçados.	6) utilize a lateral do disco abrasivo para qualquer finalidade.
7) sempre use proteções que cubram, pelo menos, a metade do disco abrasivo.	7) acione a máquina antes de montar a proteção de segurança.
8) deixe o disco abrasivo funcionar em rotação de trabalho com a proteção por, pelo menos, um minuto antes de iniciar os cortes.	8) permaneça diretamente em frente à linha de ação de um disco abrasivo com a máquina em operação.
9) sempre use proteção devida para os olhos quando em operação.	9) aperte, torça ou flexione o disco abrasivo.
10) desligue o refrigerante antes de parar o disco abrasivo para evitar desbalanceamento.	10) force o corte de uma peça quando o motor diminui notoriamente a rotação.
	11) corte sem ventilação apropriada.

Segundo Johnson (1989), uma vez selecionado o disco abrasivo a ser utilizado na máquina, deve-se seguir algumas recomendações para se obter o máximo de produtividade da máquina e do disco abrasivo. Estas recomendações são:

- para aumentar a vida do disco abrasivo deve-se usar grãos mais grossos e duros, desde que produzam peças aceitáveis;
- os cortes devem ser feitos o mais rápido possível, utilizando toda a potência disponível;
- deve-se utilizar a máxima rotação possível do disco abrasivo, nunca excedendo ao permitido;
- a peça deve ser orientada ao longo de sua menor dimensão, evitando grandes áreas de contato;
- a peça deve ser seguramente fixada;
- a máquina deve ser mantida em boas condições de trabalho. Rolamentos gastos do eixo árvore e acessórios de fixação inadequados podem afetar a eficiência do disco abrasivo e gerar a quebra desnecessária do mesmo.

2.2 - Utilização dos discos abrasivos no meio industrial e em pesquisas

Mediante a grande versatilidade das operações de corte com discos abrasivos, tem-se observado a extensa aplicação deste método de corte em diversas áreas da indústria metal-mecânica. A figura 2.1 mostra uma seleção aleatória de seções cortadas de materiais metálicos em diferentes formas. Trata-se de um indicativo da variedade de usos da operação de corte com discos abrasivos em trabalhos com metais.



Figura 2.1: Diversos exemplos de seções metálicas de diferentes formas, cortadas pelo processo de corte por disco abrasivo (Farago, 1980).

Através de uma ampla pesquisa bibliográfica, constatou-se que as pesquisas sobre discos abrasivos ainda são incipientes. No próximo item são apresentados sucintamente os trabalhos relacionados a este processo de corte.

2.2.1 - Análise do efeito da operação de corte com discos abrasivos na superfície de diferentes materiais

A técnica de seccionamento de materiais metálicos e cerâmicos geralmente envolve processos mecânicos. Dependendo da aplicação, as peças são cortadas, retificadas e polidas. Durante as etapas de preparação desses materiais, desenvolvem-se distorções estruturais de diferentes graus e em várias camadas da superfície da peça. A profundidade dessas camadas distorcidas é avaliada pela magnitude da rugosidade superficial da peça e pela

profundidade da deformação na estrutura cristalina do material defeituoso. Estas distorções dependem do processo de corte utilizado.

O conhecimento desses defeitos é muito importante na prática metalográfica, como também nas medidas da orientação de cristais simples, estudos da transmissão de raio-X e determinação da textura superficial da peça.

Wellner (1980), discutiu os defeitos da rede cristalina resultante dessas distorções. O método de reflexão por raio-X foi utilizado para detectar tais defeitos. Foram constatadas diferenças características entre as superfícies dos materiais cortados por diferentes discos abrasivos utilizados. Quando as amostras foram cortadas por discos abrasivos convencionais (Al_2O_3 e SiC), notou-se riscos significativos na camada superficial do material. No corte com disco abrasivo diamantado de baixa rotação, os riscos foram significativamente menores. Também foram realizados alguns cortes por eletro-erosão a fio, para possibilitar uma análise comparativa entre os processos de corte.

A rugosidade superficial média da secção cortada foi de 1 a 3 μm na maioria dos materiais cortados com disco abrasivo convencional, 0,1 a 0,3 μm com disco abrasivo diamantado de baixa rotação e 3 a 6 μm com eletro-erosão a fio.

O método da reflexão por raio-X mostrou que as superfícies obtidas através do disco abrasivo convencional e da eletro-erosão a fio ficaram tão defeituosas que não apresentaram reflexões. Nesse caso, o corte por disco abrasivo diamantado resultou numa superfície que forneceu algumas reflexões distorcidas. A análise também foi executada num plano 25 μm mais profundo (através de polimento eletrolítico) e reflexões esparsas apareceram no material cortado com disco abrasivo convencional e com eletro-erosão. Neste caso, o material cortado com o disco abrasivo diamantado apresentou uma rede cristalina sem distorções.

Esses defeitos apresentados são decorrentes, principalmente, dos efeitos mecânico e térmico (em menor intensidade), mesmo tendo sido utilizado corte submerso. O efeito da temperatura gerada pelo disco abrasivo diamantado foi pequena, pois a temperatura atingida na região de corte foi menor do que 50 °C. No processo de corte por eletro-erosão a fio, tais defeitos ocorreram principalmente pelo efeito térmico. As mudanças drásticas de temperatura, que ocorrem durante a vaporização e condensação, resultam na fadiga da rede cristalina.

Medições de microdureza nas seções transversais da peça mostraram que a têmpera severa ocorre nas regiões periféricas deformadas.

2.2.2 - Discos abrasivos, do tipo desbaste, utilizados em fundições

Segundo Luther (1995), os discos abrasivos do tipo desbaste são utilizados na remoção do excesso de material de peças fundidas. O custo deste desbaste é estimado numa faixa de 15 a 30% do custo total da produção da fundição. Os fatores que afetam este custo são: tipo de material a ser desbastado, volume de produção, requisitos de acabamento e peso, tamanho e complexidade do fundido.

Os custos dos desbaste variam com os desbastes extras, requeridos nas seguintes áreas: remoção das hastes de entrada, remoção das emendas da fundição, remoção das rebarbas do macho, remoção de areia queimada, retoque de emendas desparelhadas, remoção de metal extra causado por quebra de macho, remoção de metal extra causado por peças quebradas do molde de areia durante o enchimento e preparação da superfície do fundido para acoplamentos de máquinas e melhoramento do acabamento da superfície.

Também são utilizados discos abrasivos para operação do tipo “cut-off” nas fundições, para a remoção de canais, desbaste de fundidos com contornos especiais que são difíceis de serem alcançados com discos abrasivos de desbaste normais, e corte das amostras de metal para testes de laboratório e análises espectrográficas.

2.2.3 - Discos abrasivos utilizados para o corte de placas e chapas de elevada resistência ao desgaste

Segundo Rastetter (1993), o corte de placas de alta resistência ao desgaste é difícil de ser feito por cisalhamento a frio. O primeiro processo de corte a ser aplicado para este tipo de necessidade foi o oxi-corte. Entretanto, este método não preenche os requisitos referentes à qualidade de corte, que são superfícies de corte limpas, sem danos térmicos, retilíneas e com ausência de rebarbas.

Por razões implícitas ao próprio processo de corte abrasivo, optou-se por utilizá-lo para esta operação. Para isso, foram realizados testes em uma máquina de corte abrasivo convencional. Os resultados dos cortes das placas de alta resistência ao desgaste, de aproximadamente 800 mm de largura, várias espessuras e tipos de materiais, foram satisfatórios e

resultaram na decisão de se projetar uma máquina de corte abrasivo específica para corte de placas, o que representou uma novidade neste setor.

Por razões de produção e custo por corte, o fabricante da máquina de corte garantiu a obtenção de dois parâmetros de avaliação: taxa de remoção específica de material maior que $1.000 \text{ mm}^3/\text{mm.s}$, o que significa que uma placa de 2.500 mm de largura e 10 mm de espessura é cortada em menos de 25 segundos e a relação G (relação entre o volume de material removido e volume de disco abrasivo gasto) maior que 3. Isto significa que com a placa citada um disco abrasivo de 1.000 mm de diâmetro externo deve ser capaz de realizar 75 cortes.

A máquina desenvolvida realiza cortes em 150.000 toneladas de peças por dia. Aproximadamente 90% destas são de placas de elevada dureza e de resistência ao desgaste, 6% são de placas blindadas e o restante de placas estruturais de alta resistência mecânica. As placas a serem cortadas possuem espessura de 5 a 35 mm (em média de 10 a 12 mm) e largura de 1.000 a 3.500 mm (em média 2.500 mm). Antes de serem cortadas, as placas possuem 18 metros de comprimento, podendo ser executados de 2 até 15 cortes por placa (em média 5).

Baseados nos parâmetros práticos de avaliação, o consumo de disco abrasivo foi calculado em 3.000 discos abrasivos por ano.

As longas placas, separadas na laminação, são marcadas e transportadas por mesa rolante, para o corte das rebarbas e retalhamento em dois ou mais comprimentos. Na frente da máquina de corte, as placas são alinhadas e sua forma retangular é medida por laser.

Para os cortes das placas a serem vendidas, a placa é transportada para o rolo medidor longitudinal de encontro ao carro medidor. Durante o transporte os rolos de elevação são acionados para evitar deslizamentos na mesa de fixação da máquina. Durante o corte, a placa é firmemente fixada contra a mesa da máquina por grampos. As partes irregulares são empurradas sobre a cinta transportadora de refugos ou então são divididas mais uma vez.

As escovas rebarbadoras na saída da máquina proporcionam segurança, precisão nas áreas cortadas e exclusão de rebarbas.

Um exaustor externo e um coletor de poeira retiram as poeiras de diferentes tamanhos.

As partículas de pó grossas, que não são exauridas na câmara de abrasão, caem na câmara de água do coletor de pó, feito de aço inoxidável. As partículas esfriam-se rapidamente e formam uma borra.

2.2.4 - Análise do desgaste de discos abrasivos do em operações tipo “cut-off” e os métodos para aumentar suas vidas

Para encontrar meios de otimizar a vida dos discos abrasivos, Mamin et al. (1989) desenvolveram uma pesquisa sobre o desgaste diametral de discos abrasivos, fabricados com baquelite como ligante, em função do tempo de corte e da composição e estrutura dos discos abrasivos.

Foram utilizados discos abrasivos de diferentes estruturas e reforçados por uma malha de fibra de vidro. O material da peça utilizada foi o ferro fundido, com dureza de 170-240 HB e diâmetro externo de 100 mm. A velocidade de corte inicial utilizada para o disco abrasivo foi de 80 m/s, e a velocidade periférica da peça variava de 40 a 60 m/s.

O desgaste dos discos abrasivos foi determinado pela sua perda diametral durante o contato dinâmico com a peça cortada. Como consequência do desgaste da superfície de corte dos discos abrasivos, ocorre sua fratura e desprendimento dos grãos abrasivos.

Antes de se iniciar os ensaios, esperava-se uma redução significativa do desgaste da superfície de corte do disco abrasivo pelo aumento da força de retenção do ligante sobre os grãos abrasivos.

Foram utilizados grãos de eletrocoríndon de uma única marca com granulometria de 50-80 mesh. Também foi utilizada uma mistura de granulometrias, sendo que estas foram introduzidas em combinação com uma pequena fração de carbetto de silício. Como aditivos especiais foi introduzida a criolita com nitreto de boro hexagonal e carbonato de cálcio.

Na figura 2.2 são apresentados os resultados obtidos por Mamin et al. (1989).

Quando as características das curvas experimentais são comparadas, é assumido que os mecanismos de desgaste dos discos abrasivos são idênticos, para as dadas condições de corte. Entretanto, a diferença substancial na vida dos discos abrasivos é devido ao desgaste de cada disco abrasivo, que possuem diferentes características, que ocorre em função das influências das configurações de composição e estrutura.

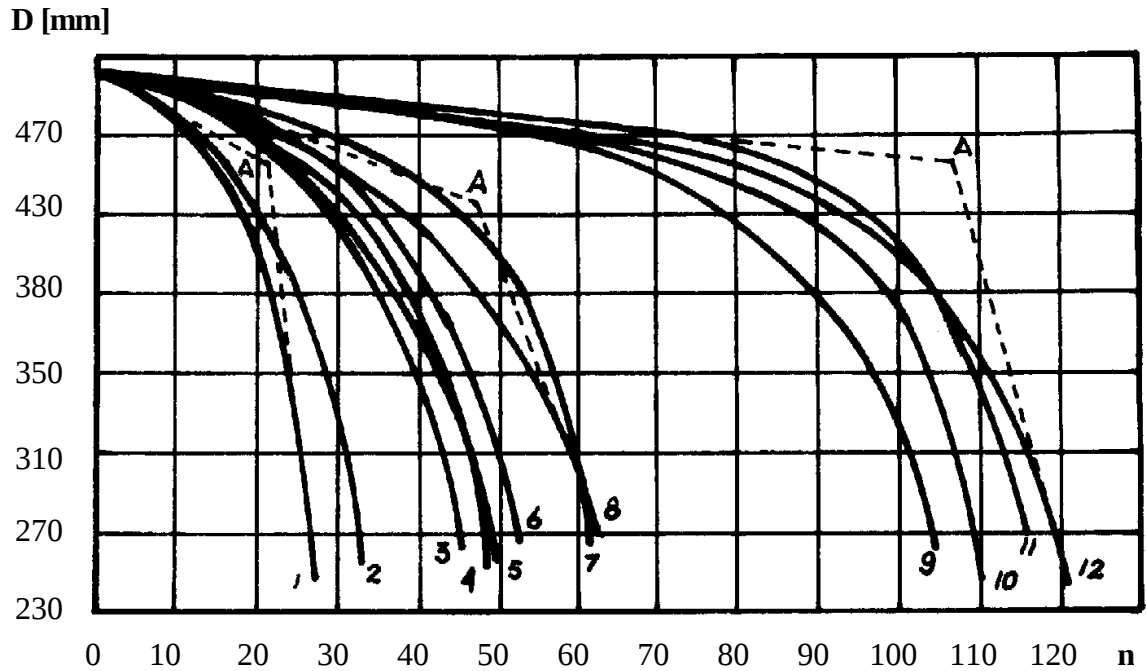


Figura 2.2: Dependência do diâmetro de discos abrasivos de ligante de baquelite pelo número de cortes calculados (Mamin et al., 1989).

Na tabela 2.3 são apresentados os lotes utilizados, a designação e porosidade dos discos abrasivos e os coeficientes cinéticos calculados.

Dos resultados obtidos dos ensaios executados com cada lote de discos abrasivos, observou-se a variação diametral do disco abrasivo. Esta variação pode ser aproximada por uma equação exponencial empírica da forma:

$$D_f = D_0 - a \times e^{b' \times N_c} \quad (2.1)$$

onde D_f e D_0 são os diâmetros externos final e inicial do disco abrasivo; N_c é o número de cortes até o limite máximo do desgaste do disco abrasivo; a e b' são coeficientes adimensionais.

Da comparação dos coeficientes a e b' , com ênfase na melhoria da produtividade, foi observado que a variação do coeficiente b' é substancialmente maior do que a . Pode-se assumir que o coeficiente b' é determinado basicamente pela própria resistência ao desgaste dos grãos abrasivos, sendo esta função da sua natureza química, resistência ao desgaste e

densidade de grãos na superfície de corte. Isto é confirmado pelo aumento da resistência ao desgaste (até 18% a mais) dos discos abrasivos dos lotes 8 a 12 feitos de uma mistura de materiais abrasivos. A vida destes discos abrasivos é aumentada mesmo pela pouca densidade de grãos abrasivos, como é visto na comparação dos lotes 8 e 6.

Tabela 2.3: Dados técnicos dos discos abrasivos de baquelite e resultados dos coeficientes cinéticos calculados (Mamin et al., 1989).

Lote	Designação dos discos abrasivos	Porosidade dos discos abrasivos (%)	Coeficiente cinéticos calculados			
			a	b'	C _q	m
1	14A50T2BU	15	0.26	0.18	0.74	0.90
2	14A50T2BU	12	0.30	0.14	0.70	0.89
3	14A63T2BU	15	0.25	0.11	0.55	0.85
4	14A63T2BU	12	0.29	0.10	0.54	0.85
5	14A63T2BU	12	0.30	0.10	0.54	0.85
6	14A80T2BU	15	0.25	0.09	0.49	0.84
7	14A80BTBU	12	0.30	0.07	0.48	0.84
8	14A50-24A50T2BU	10	0.40	0.07	0.51	0.82
9	37A53-24A50T2BU	12	0.30	0.04	-	-
10	14A80-24A50T2BU	12	0.28	0.04	0.66	0.74
11	38A80-14A63T2BU	12	0.28	0.04	0.65	0.73
12	14A63-24A50T2BU	12	0.34	0.03	-	-

Obs.: lote 2 com tratamento térmico adicional; lotes 4 e 5 com introdução de BN(nitreto de boro) e CaCO₃. Para o lote 7 estrutura número 4; para o resto dos lotes-estrutura número 5.

Com relação à vida útil dos discos abrasivos, os lotes de 9 a 12 são os mais caracterizados pelo baixo coeficiente **b'** (0,030-0,042). Entretanto, o coeficiente **b'** também reflete a influência da estrutura do disco abrasivo em seu desgaste. Assim, da comparação dos valores de **b'** dos discos abrasivos dos lotes 6 e 7, que diferem um do outro por apenas um número de estrutura, como também dos valores dos lotes 1 e 2, pode-se esboçar a conclusão de que o tratamento térmico adicional (lote 3) causou uma queda na sua porosidade, um aumento na densidade do ligante e elevação da mudança na estrutura do material.

Em contraste ao comportamento decrescente de **b'**, observou-se que o coeficiente **a** variou em faixas nos três grupos divididos por:

Grupo I. lotes 1, 3 e 6 (a = 0,25-0,26);

Grupo II. lotes 2, 4, 5, 7, 9, 10 e 11 (a = 0,28-0,30);

Grupo III. lotes 8 e 12 ($a = 0,34-0,40$).

A comparação das características dos discos abrasivos entre si, em cada grupo, e as pequenas variações do coeficiente **a** permitem concluir que este reflete as propriedades do ligante e a porosidade da superfície de corte do disco abrasivo. O coeficiente **a** reflete a redução das porosidades dos discos abrasivos, que ocorre no caso de tratamento térmico adicional (lote 2), quando partículas de preenchimento das porosidades são introduzidas na sua composição (lotes 4 e 5). Isto também ocorre no caso de uma mistura de materiais abrasivos ter diferentes quantidades de grãos (lote 8) ou com quantidades reduzidas de vários tipos de grãos (lote 12).

Se o mecanismo de auto-afiação dos grãos abrasivos na superfície de corte do disco é minimizado, o desgaste é reduzido.

A tentativa de se reduzir o atrito entre os grãos abrasivos e a peça, com a utilização de lubrificantes sólidos no material ligante, não levou a um resultado positivo notável.

Portanto, pela pequena influência do coeficiente **a** no desgaste do disco abrasivo, pode-se concluir que este processo de corte é influenciado principalmente pelas propriedades do material abrasivo (coeficiente **b'**).

Uma maneira de distinguir os fenômenos ocorridos é o fato de que os discos abrasivos operam sob condições severas no contato dinâmico com a peça. Estes fenômenos ocorrem pela transformação da energia cinética (dentro de um curto intervalo de tempo e num pequeno comprimento de contato) em remoção das camadas da superfície do material e pela geração de calor, que proporciona maior desgaste do disco abrasivo.

Portanto, como o contato entre o disco abrasivo e a peça muda (já que a velocidade de corte é decrescente), observa-se a mudança nos fenômenos de desgaste e, conseqüentemente, da perda diametral do disco abrasivo.

À medida em que o disco abrasivo corta as peças, observa-se uma diminuição da resistência ao desgaste diametral em todos os lotes de discos abrasivos. Como exemplo, pode-se citar que quando os discos abrasivos de 500 mm de diâmetro externo inicial atingem a faixa de diâmetro de 430 a 450 mm, pode ser caracterizado o ponto de transição crítica no mecanismo de desgaste do disco abrasivo.

Comparando-se a natureza da variação da relação $D_f = f(N_c)$, nota-se que depois do ponto crítico **A** (figura 2.2), a intensidade do desgaste diametral do disco abrasivo aumen-

tou substancialmente, e os desgastes de todos os discos abrasivos desenvolveram-se aproximadamente da mesma forma.

Isto é explicado por Mamin et al. (1989) pelo fato de que no estágio inicial de corte, o desgaste dos grãos abrasivos, com renovação da superfície de corte, predomina enquanto que depois do ponto crítico, como uma consequência de um fator geométrico gerado pelo desgaste do disco abrasivo (perda diametral), a desagregação do ligante predomina.

Sendo a força tangencial de corte necessária para arrancar um grão abrasivo da superfície de corte proporcional ao limite elástico do ligante, e não dependente do tamanho e das propriedades dos grãos abrasivos, o ligante é responsável pelo desgaste acelerado do disco abrasivo depois do ponto crítico. Assim, para reduzir o desgaste dos discos abrasivos, depois do ponto crítico, deve-se utilizar novos ligantes com propriedades melhoradas.

Levando-se em conta a influência da velocidade de corte no desgaste dos discos abrasivos, os dados foram aproximados por uma equação da forma:

$$Q_a = C_q \cdot Q_w^m \quad (2.2)$$

onde Q_a [mm^3/s] é a taxa de desgaste volumétrica; C_q é o coeficiente para uma taxa de desgaste, Q_w [mm^3/s] é a taxa de remoção de material no tempo e m é um multiplicador logarítmico.

Para os lotes 1 a 7, como a quantidade de grãos abrasivos e a dureza dos discos aumentaram, o desgaste diametral do disco abrasivo tendeu a ser menor. Entretanto, no caso de discos abrasivos confeccionados com grãos misturados (lotes 8 a 12) esta tendência é perturbada. Este é um resultado que é confirmado pelo aumento dos coeficientes C_q e do multiplicador logarítmico m . Isto é aparentemente causado pelo fato de que para discos abrasivos com grãos misturados, o processo de corte à velocidade de corte de 80 m/s não é eficiente. Levando em consideração que para cada disco abrasivo existe uma resistência ao desgaste ótima, esta é determinada por sua rotação abaixo da qual a resistência ao desgaste diminui. Conclui-se que a eficiência de tais discos abrasivos pode ser aumentada utilizando-se velocidades de corte mais elevadas, excedendo a 80 m/s.

2.2.5 - Análise do tempo de corte com discos abrasivos pelo controle da velocidade de corte

Para avaliar o comportamento de discos abrasivos controlando-se a rotação do motor de acionamento, Bianchi et al. (1995 a, 1995 b, 1996) realizaram ensaios experimentais mantendo-se a velocidade de corte constante em um dos casos estudados e variando-a em outro, proporcionalmente à perda diametral do disco abrasivo. Trata-se do único trabalho científico nacional sobre discos abrasivos, que foi o antecessor deste trabalho.

Os esforços aplicados do disco abrasivo sobre o material foram controlados de tal forma que a rotação do motor, para uma determinada velocidade de corte, ficasse mantida constante. Assim, os esforços foram controlados para que não houvesse perda volumétrica do disco abrasivo pela ação de sobrecarga nos grãos abrasivos, que poderiam provocar a liberação antecipada destes.

Para a realização dos ensaios, foram utilizados dois discos abrasivos idênticos e várias barras de aço trefilado ABNT 1045 (com diâmetro de 12,7 mm e 1 metro de comprimento), como material a ser cortado.

Deste trabalho pode-se concluir que a velocidade de corte influencia significativamente o tempo de corte, pelas modificações da fenomenologia de corte provocadas pela superfície de corte do disco abrasivo. Foi constatado que quando se controla a rotação do motor de acionamento (neste caso utilizando-se um inversor de frequência), pode-se obter ganhos da ordem de 49,63% no tempo de corte.

2.3 - A segurança do trabalho na utilização de discos abrasivos

Todos os aspectos relacionados à segurança do trabalho são fundamentais. Entretanto, observou-se que não é dada a devida atenção, por parte dos usuários, às doenças causadas pela presença humana num meio ambiente insalubre (ruído e fuligem). Isto ocorre pelo desconhecimento dos efeitos maléficos que podem advir, pela não utilização dos equipa-

mentos de proteção, e por seus efeitos manifestarem-se a longo prazo, sendo estes danos irreversíveis.

Por outro lado existe uma preocupação comum com possíveis acidentes fatais, tais como lesões em geral. Esta preocupação desvia a atenção das doenças que ocorrem a longo prazo, e que certamente irão ocorrer.

Por estas razões, neste item será feita uma ampla abordagem sobre as principais causas resultantes do processo de corte por discos abrasivos que são prejudiciais à saúde do operador. Também será feita uma breve explanação sobre os equipamentos que podem ser utilizados para coibir os possíveis danos físicos.

2.3.1 - Poluição sonora - ruído

Segundo Fernandes (1995), os altos níveis de ruído têm se transformado, nas últimas décadas, em uma das formas de poluição que mais tem preocupado os engenheiros.

O ruído pode ser definido, de forma subjetiva, como toda sensação auditiva desagradável ou, de maneira física, como todo fenômeno acústico não periódico e sem componentes harmônicos definidos.

De modo geral, os ruídos podem ser agrupados em 3 tipos:

- Ruídos contínuos: são aqueles cuja variação de nível de intensidade sonora é muito pequena em função do tempo. São ruídos característicos de bombas de líquidos, motores elétricos, engrenagens etc.
- Ruídos impulsivos ou de impacto: apresentam altos níveis de intensidade sonora, num intervalo de tempo muito pequeno. São os ruídos provenientes de explosões e impactos. São ruídos característicos de rebidadeiras, britadeiras, prensas etc.
- Ruídos flutuantes: são aqueles que apresentam grandes variações de nível em função do tempo. São geradores desse tipo de ruído os trabalhos manuais, afiação de ferramentas, soldagem, trânsito de veículos etc. Os ruídos resultantes do processo de corte com discos abrasivos são desta natureza.

Cada forma de ruído exige um método próprio de medição, que é realizada por medidores de nível de pressão de som, que estejam de acordo com as normas internacionais.

No Brasil, os critérios para medição e avaliação do ruído em ambientes são fixados pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas. As principais normas são:

- NBR 7731: Guia para execução de serviços de medição de ruído aéreo e avaliação dos seus efeitos sobre o homem;
- NBR 10151: Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade;
- NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico.

Nesta última, que mais se adapta ao objetivo deste trabalho, a fixação dos limites de ruído para cada finalidade do ambiente é feita de duas formas: pelo nível de ruído encontrado em medição normal (em dB(A)), ou com o uso das curvas NC (Noise Criterion).

Trabalhos científicos relacionados com o ruído ambiental demonstram que uma pessoa só consegue relaxar totalmente durante o sono, em níveis de ruído abaixo de 39 dB(A), enquanto a Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece 55 dB(A) como nível médio de ruído diário para uma pessoa viver bem. Estes dados podem servir como referência para outras atividades desenvolvidas em locais adversos.

Para a avaliação da insalubridade por ruído em locais de trabalho, a Consolidação das Leis do Trabalho, na Portaria 3214, NR 15, estabelece os limites de exposição ao ruído para trabalhadores brasileiros, visando protegê-los de danos auditivos.

Os médicos recomendam que pessoas submetidas a níveis de ruído acima de 80dB(A), devam se proteger com o uso de protetores auriculares.

São três os tipos de deficiências auditivas decorrentes da exposição ao ruído:

- condutiva: Distúrbios de condução nos ouvidos externo e médio;
- neurossensial: Distúrbios na cóclea, no nervo auditivo ou nas vias centrais de audição;
- combinados: quando os distúrbios se sobrepõem.

Entre os testes de audição, o mais usado para detectar os problemas de trauma sonoro por exposição a altos níveis de ruído é a audiometria tonal. Esta é feita utilizando-se um audiômetro, que é um aparelho eletrônico gerador de sons puros, capaz de registrar o audiograma, que é um gráfico da sensibilidade auditiva do paciente. O audiograma é a principal ferramenta do médico para determinação de deficiências auditivas.

Quando uma pessoa é submetida a altos níveis de ruído (como é o caso de operadores de máquinas de corte por discos abrasivos), existe a reação de todo o organismo a esse estímulo.

As alterações na resposta involuntária ou inconsciente de uma pessoa são:

1. Principais alterações fisiológicas reversíveis: dilatação das pupilas, hipertensão sanguínea, mudanças gastro-intestinais, reação da musculatura, vaso-constricção das veias.
2. Principais mudanças bioquímicas: mudanças na produção de cortisona, hormônio da tireóide, glicose sanguínea, proteína do sangue, adrenalina e fracionamento dos lipídios do sangue.
3. Os efeitos cardiovasculares são: aumento dos níveis de pressão sanguínea sistólico, diastólico e hipertensão arterial.
4. Em relação aos efeitos sociológicos: irritação geral e incômodo, perturbação na comunicação por conversação, telefone, rádio e televisão, prejudica o repouso e o relaxamento dentro e fora da residência, perturbação do sono, prejudica a concentração e desempenho no trabalho, sensação de vibração, associação do medo e ansiedade e mudança na conduta social.

Os efeitos do ruído sobre o aparelho auditivo são os únicos reconhecidos pela legislação brasileira, e podem ser divididos em 3 fases:

1. Mudança temporária do limiar auditivo (TTS): é um efeito a curto prazo que representa uma mudança da sensibilidade da audição, dependendo da suscetibilidade individual, do tempo de exposição, e da intensidade do ruído. Essa queda do limiar retorna gradualmente ao normal depois de cessada a exposição;
2. Mudança permanente do limiar auditivo: é decorrente de um acúmulo de exposições ao ruído. Inicia-se com zumbido, cefaléia, fadiga e tontura. A seguir o indivíduo tem dificuldade em escutar os sons agudos, além de confundir os sons em ambientes ruidosos. Numa última fase, o déficit auditivo interfere diretamente na comunicação oral, tornando-a difícil ou praticamente impossível. Pode aparecer também um zumbido permanente que piora as condições auditivas e perturba o repouso;
3. Trauma acústico: é definido como uma perda súbita da audição, decorrente de uma única exposição ao ruído muito intenso. Geralmente aparece o zumbido, podendo haver o rompimento da membrana timpânica.

Os fatores que contribuem para a perda auditiva são: o nível de intensidade sonora, o tempo de exposição, a frequência do ruído e a susceptividade individual.

Em função das últimas pesquisas médicas, algumas afirmações podem ser feitas:

- Pessoas expostas ao nível de 85 dB(A); a maioria acusa TTS e também demonstram perda permanente de audição. Quase a totalidade demonstra desconforto acústico;
- Pessoas expostas ao nível de 80 dB(A); entre 5 e 10% acusou perda permanente de audição;
- Pessoas expostas a níveis entre 78 e 80 dB(A); entre 2 e 5% acusou perda permanente de audição.

A Consolidação das Leis Trabalhistas (C.L.T.) é bem mais objetiva que as Normas Brasileiras. Na Portaria Nº 3214, de 08/06/78, na Norma Regulamentadora (N.R.) Nº 15, Anexo Nº 1, são estabelecidas todas as condições de insalubridade por ruído. Para ruídos contínuos ou flutuantes a N.R. 15 apresenta uma relação entre o nível de ruído (dB(A)) emitido e a máxima exposição diária permissível, conforme é apresentado na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Relação entre o nível de ruído (dB(A)) emitido e a máxima exposição diária permissível (Portaria 3214, NR15).

Nível de ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível	Nível de ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas	98	1 horas e 15 minutos
86	7 horas	100	1 hora
87	6 horas	102	45 minutos
88	5 horas	104	35 minutos
89	4 horas e 30 minutos	105	30 minutos
90	4 horas	106	25 minutos
91	3 horas e 30 minutos	108	20 minutos
92	3 horas	110	15 minutos
93	2 horas e 30 minutos	112	10 minutos
94	2 horas e 15 minutos	114	8 minutos
95	2 horas	115	7 minutos
96	1 hora e 45 minutos	---	---

Para uma constatação aproximada do nível de ruído emitido pelo processo de corte com discos abrasivos, foi realizado um teste em ambiente aberto e com a máquina de corte do tipo basculante, numa operação manual severa de corte. Para tanto, foi utilizado um decibelímetro da marca ENTELBRA, modelo ETB142, com capacidade de leitura na faixa

belímetro da marca ENTELBRA, modelo ETB142, com capacidade de leitura na faixa de 110dB(A) - escala A, que corresponde à sensibilidade do ouvido humano. Constatou-se que o nível de ruído com a máquina funcionando em vazio é de 85 dB(A) e durante o corte 107 dB(A).

De acordo com a tabela 2.4, a exposição diária máxima admissível é de 20 minutos. Conforme a OMS, este nível de ruído é muito superior ao nível médio de ruído para que uma pessoa possa viver bem (55 dB(A)). Portanto, é fundamental a utilização de proteção auricular para amenizar o ruído.

2.3.1.1 - Atenuação da poluição sonora

Para o controle do ruído, devem ser aplicados métodos de atenuação do efeito do ruído sobre as pessoas. O controle do ruído não significa a supressão da causa, mas sim a manipulação do efeito.

Alguns aspectos devem ser observados para o controle do ruído: Avaliação da exposição individual, características do campo acústico, condições de comunicação oral, tipo e exposição do ruído, número de empregados expostos, características do local e ruído de fundo.

De um modo geral, o controle do ruído pode ser executado primeiramente sobre a fonte, sobre meio de propagação ou sobre o receptor (que é o próprio operário). Neste caso, o controle deve ser feito na ordem hierárquica apresentada, preferindo-se a proteção coletiva à individual.

Para as operações de corte por discos abrasivos, o controle sobre a máquina (fonte) pode ser executado através da utilização de câmaras atenuadoras, instaladas sobre a máquina, caso isto seja possível. Outra forma de atenuação é a redução das vibrações das regiões de contato ou áreas de movimento relativo, através da aplicação de materiais de junção com capacidade de absorção de impacto e, conseqüentemente, ruídos.

O controle de ruído pelo meio da propagação fica prejudicado pelo fato de que as máquinas geralmente são controladas diretamente pelos operadores. Pode-se pensar, então, no isolamento das paredes do local que encerra as máquinas ou das paredes das outras repartições da empresa, visando a proteção dos outros operários que permanecem nos arredores. No caso de máquinas totalmente automáticas, pode ser realizado um enclausuramento da fonte, isolando-a acusticamente do meio externo.

Quando todas as medidas de controle de ruído não forem suficientes, deve-se considerar a proteção individual. Mas antes da proteção individual, existem algumas medidas que podem diminuir os efeitos do ruído sobre os operários:

- Rodízio de turnos: A diminuição do tempo de exposição diminui o risco de perda auditiva. Esse rodízio é de difícil aplicação na prática e cria sérios problemas à produtividade pela influência humana sobre o processo;
- Cabines de repouso: São cabines à prova de som, onde o trabalhador exposto a altos níveis de ruído pode descansar por alguns minutos. Na Europa muitas empresas têm implantado essas cabines. Normalmente o tempo de repouso é de 5 minutos para cada 55 minutos de trabalho.

O último dos recursos a ser considerado para redução dos efeitos do ruído são os protetores individuais, que podem ser de inserção (tampões), supra-auriculares, circum-auriculares (conchas) ou elmos (capacetes).

Os protetores de inserção são dispositivos colocados dentro do canal auditivo, podendo ser descartáveis ou não. Os descartáveis podem ser de material fibroso, de cera ou de espuma. Os não descartáveis, de borracha, devem ser esterilizados todos os dias. Os de espuma (moldável), são descartáveis, perdendo sua eficiência na primeira lavagem.

Os protetores supra-auriculares são provisórios, e usados em visitas e inspeções. São bastante incômodos e proporcionam pequena proteção contra o ruído.

Os protetores circum-auriculares, também conhecidos como conchas, são semelhantes aos fones de ouvidos, recobrem totalmente o pavilhão auditivo, assentando-se no osso temporal. Fornecem uma boa proteção, permitindo ao mesmo tempo uma boa movimentação do operário, reduzindo as precauções higiênicas ao mínimo.

Os protetores de elmo (capacetes) são pouco usados. Eles cobrem hermeticamente a cabeça, se constituindo numa tentativa de solucionar os problemas de ruído, proteção dos olhos, respirador e capacete. Tiram a liberdade de movimentação do operário, além de causar ressonâncias internas que podem aumentar os problemas de ruído.

A tabela 2.5 apresenta uma comparação entre protetores tipo conchas e tampões, que são os mais utilizados no ambiente industrial.

Deve-se ressaltar que os protetores individuais diminuem o contato do trabalhador com o meio ambiente. Isto resulta numa série de problemas, tais como: aumento dos acidentes

de trabalho, não comunicação com os outros funcionários, aumento da tensão e irritação e queda da produtividade. Portanto, os protetores individuais devem ser considerados apenas como última solução, ou numa situação de emergência.

Tabela 2.5: Comparação entre protetores tipo conchas e tampões (Fernandes, 1995).

Circum-auriculares (conchas)	Inserção (tampões)
Eliminam ajustes complexos de colocação. Podem ser colocados perfeitamente por qualquer pessoa.	Devem ser adequados a cada diâmetro e longitude do canal auditivo externo.
São grandes e não podem ser levados facilmente nos bolsos das roupas. Não podem ser guardados junto com as ferramentas.	São fáceis de se carregar e de serem esquecidos ou perdidos.
Podem ser observados a grande distância, permitindo tomar providências para comunicação oral.	Não são vistos e facilmente notados, criam dificuldade na comunicação oral.
Interferem com óculos pessoais ou EPIs.	Não dificultam o uso de óculos ou EPIs.
Podem ajustar-se mesmo quando se usam luvas.	Deve-se tirar as luvas para poder colocá-lo.
Podem acarretar problemas de espaço em locais pequenos e confinados.	Não produzem problemas por limitação de espaço.
Podem produzir contágio somente quando usados coletivamente.	Podem infectar ou lesar ouvidos saudáveis.
Podem ser confortáveis em ambientes frios, mas muito desagradáveis em ambientes quentes.	Não são afetados pela temperatura ambiente.
Sua limpeza deve ser feita em locais apropriados.	Devem ser esterilizados freqüentemente.
Podem ser usados por qualquer pessoa, de ouvidos saudáveis ou enfermos.	Podem ser inseridos apenas em ouvidos saudáveis.
O custo inicial é grande, mas sua vida útil é longa.	O custo inicial é baixo, mas sua vida útil é curta.

Os operadores das máquinas de corte por discos abrasivos deverão, inevitavelmente, protegerem-se com esses tipos de abafadores acústicos, em função da impossibilidade de isolamento sonoro da máquina e da proximidade do operador com a fonte de ruído.

2.3.2 - Poluição do ar - toxicologia

Segundo Tomé & Capobianco (1995), os principais agentes químicos contaminantes da atmosfera de trabalho são, geralmente, gases, vapores e/ou material particulado.

A fase de exposição corresponde à presença dessas substâncias químicas no ambiente de trabalho, que são introduzidas pela via respiratória.

A fase toxicocinética corresponde à absorção, distribuição, bio-transformação, acumulação e eliminação do agente químico. A substância química, uma vez absorvida pelo organismo, interage com moléculas específicas e provoca desde leves desequilíbrios até a morte, caracterizando, assim, a fase toxicodinâmica.

A fase clínica corresponde ao aparecimento de sinais e sintomas, que caracterizam os efeitos tóxicos e evidenciam a ocorrência do fenômeno.

As operações de corte por disco abrasivo emitem grande quantidade de partículas ou aerodispersóides, que são constituídos por partículas de tamanhos microscópicos, no estado sólido, dispersos no ar atmosférico. Estas partículas também podem ser denominadas poeiras ou fumos.

Por definição, as poeiras formam-se pela desagregação mecânica de sólidos maiores, como por exemplo minérios, madeiras, grãos e amianto, durante os processos de corte e polimento de granito.

Já os fumos são gerados na superfície de fusão dos metais, pela condensação do estado gasoso, envolvendo processo químico de oxidação. Geralmente são partículas pequenas, de 0,001 - 0,5 μm . Alguns exemplos são: óxido de chumbo (PbO), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cádmio (CdO).

A intensidade da exposição depende, entre outros fatores, da concentração do agente tóxico no local de trabalho, do tipo e intensidade de trabalho, da duração diária da exposição ao longo da vida profissional, da frequência da exposição pelo trabalhador e das condições ambientais (temperatura, umidade e ventilação).

A via respiratória assume importância fundamental em Toxicologia Ocupacional, principalmente pelo estado físico dos agentes químicos (gases, vapores e/ou partículas); pelo constante contato que o sistema respiratório mantém com o meio externo; pela extensa área pulmonar (90 m^2); por ser permeável e ricamente vascularizada (permitindo rápida e eficiente absorção do agente químico por centros vitais, sem passar pelo sistema hepático) e pela ocorrência de agentes químicos nas vias aéreas superiores.

As substâncias ao entrarem em contato com a via respiratória poderão agir de duas formas:

1. em nível local: produzindo irritação e inflamação (gases e vapores);

2. em nível sistêmico: quando a pressão de um gás (ou vapor) no alvéolo for maior que a pressão no sangue. Sendo o sangue constituído por 75% de água, este apresenta-se como um excelente solvente.

A concentração do agente tóxico no ar respirado e o tempo de exposição é que vão determinar a intensidade da intoxicação. A absorção vai depender da ventilação pulmonar, solubilidade do tóxico e diâmetro das partículas. Esses particulados são os principais causadores da pneumoconiose, que é uma das ações tóxicas causadas por agentes químicos prevista pela toxicologia ocupacional.

A deposição de partículas na via respiratória ocorre em três regiões fundamentais:

- Nasofaringe, onde se depositam partículas de 5 a 30 μm (impactação inercial), facilitada pela presença de pêlos nasais e da adenóide. As partículas depositadas nessa região poderão ser eliminadas através da tosse, expectoração, deglutida como muco ou absorvida após solubilização do meio;
- Traqueobrônquica: a velocidade do ar é menor e a ação da força da gravidade é importante; as partículas (de 10 μm) se depositam pelo processo de sedimentação. Poderão ser eliminadas pela glote, pelos movimentos ciliares e muco, posteriormente expectoradas ou deglutidas;
- Alveolar: as partículas se depositam por difusão e poderão ser eliminadas por movimentos dos próprios alvéolos. Auxiliadas por secreções dessa região, pode haver fagocitose e partículas menores, cujas dimensões se aproximam das moléculas gasosas. Defendem-se alcançando a corrente sangüínea e as pouco solúveis sofrem um lento processo de desintegração, até serem absorvidas ou eliminadas.

2.3.2.1 - Diluição e controle de partículas emitidas

Segundo Valarelli (1995), uma das formas de dispersão de partículas pode ser feita por sistemas de ventilação. Para o caso de corte com discos abrasivos, o sistema adequado é o que fornece a manutenção da saúde e segurança do operador, que é conseguida através da redução da concentração de aerodispersóides nocivos até valores compatíveis.

A ventilação industrial pode ser feita de duas formas:

1. Ventilação geral diluidora: A ventilação geral diluidora é o método de insuflar ar em um ambiente ocupacional, de exaurir ar desse ambiente, ou ambos, a fim de promover uma redução na concentração de poluentes nocivos. A redução da concentração é feita através da diluição do poluente em um volume maior de ar. Esse método de ventilação não impede a emissão dos poluentes para o ambiente de trabalho, mas simplesmente dilui a concentração dos poluentes. Os principais objetivos desse tipo de ventilação são a proteção da saúde do trabalhador, reduzindo a concentração de poluentes nocivos abaixo de um certo limite de tolerância (limites fixados pela O.M.S.), o conforto e eficiência do trabalhador pela manutenção da temperatura e umidade do ambiente, e a proteção de materiais ou equipamentos, mantendo condições atmosféricas adequadas (impostas por motivos tecnológicos).

A aplicação com sucesso da ventilação geral diluidora depende das seguintes condições: o poluente gerado não deve estar presente em quantidade que exceda o limite de diluição, a distância entre os trabalhadores e o ponto de geração do poluente deve ser suficiente para assegurar que os trabalhadores não estarão superexpostos, a toxicidade do poluente deve ser baixa e o poluente deve ser gerado numa quantidade razoavelmente uniforme.

2. Ventilação local exaustora: A ventilação local exaustora tem como objetivo principal a proteção da saúde do trabalhador, um vez que capta os poluentes de uma fonte (gases, vapores ou poeiras tóxicas) antes que os mesmos se dispersem no ar do ambiente de trabalho, ou seja, antes que atinjam a zona de respiração do trabalhador.

De uma forma indireta, a ventilação local exaustora também influi no bem-estar, na eficiência e na segurança do trabalhador. A fim de que os poluentes emitidos por uma fonte possam ser tratados em equipamentos de controle de poluentes (filtros, lavadores etc), eles têm de ser captados e conduzidos a esses equipamentos. Na maioria dos casos isto é realizado por um sistema de ventilação local exaustora.

Basicamente, um sistema de ventilação local exaustora consiste dos seguintes componentes:

- captor: ponto de entrada dos gases a serem exauridos pelo sistema;
- sistema de dutos: responsável pelo transporte dos gases captados;

- ventilador: responsável pelo fornecimento da energia necessária à movimentação dos gases (fornece um diferencial de pressão entre o captor e a saída do sistema);
- equipamentos de controle de poluição do ar.

Os filtros são meios porosos capazes de deter e coletar partículas e névoas contidas no ar que os atravessa. Em geral, os filtros para ventilação são constituídos por material fibroso disposto sob forma de tecido ou compactado, formando placas ou painéis.

A escolha do filtro depende do tipo de pó e do “diâmetro” médio das partículas, que são estimados em diversas tabelas dos próprios fabricantes desses equipamentos.

No caso das partículas resultantes da operação de corte com discos abrasivos a situação é bastante variada, pois em função das condições de corte, a “fuligem” resultante comporta partículas de dimensões diversas. O ideal é a verificação desse valor através de simples consulta em um microscópio.

Outra opção de retenção de partículas suspensas é a aplicação de coletores de câmaras gravitacionais ou de sedimentação. Consistem essencialmente em uma câmara, em geral metálica, de dimensões grandes em relação às do duto que nela introduz o ar poluído, a fim de reduzir a velocidade de escoamento, permitindo a deposição de partículas relativamente grandes (100 a 200 microns), em consequência do peso das mesmas.

Um sistema de ventilação local exaustora deve ser projetado dentro dos princípios de engenharia, ou seja, de maneira a se obter a melhor eficiência ao menor custo possível. Por outro lado deve-se lembrar sempre que, na maioria dos casos, o objetivo principal desse sistema é a proteção da saúde do homem, e assim, esse fator deve ser considerado em primeiro lugar, e todos os demais devem estar condicionados a esse objetivo.

2.3.3 - Precauções de acidentes

Os discos abrasivos devem ser utilizados tendo-se sempre em mente a segurança do operador. Deve-se utilizar os dispositivos de segurança de maior eficácia, e neste caso qualquer economia de ordem financeira resulta em elevados gastos médicos e na perda da audição. As proteções devem ser utilizadas no operador e na máquina.

2.3.3.1 - Proteções dos operadores

Segundo a empresa NORTON (1994), para os operadores se protegerem das fagulhas, cavacos, estilhaços de disco abrasivo, queimaduras, dentre outros, devem utilizar uma série de equipamentos de proteção individual, sendo estes: óculos de proteção, óculos de segurança, protetores faciais, aventais, luvas e botas.

2.3.3.2 - Proteções na máquina

A mesma precaução de proteção deve ser tomada com relação às regiões de maior possibilidade de acidentes na máquina. Para tanto, alguns itens de segurança devem ser adotados:

1 - Dispositivos de montagem: os discos não devem ser submetidos a esforços de flexão e sua resistência a compressão é limitada. Estas características deverão ser consideradas no projeto dos flanges, para que o disco abrasivo não seja submetido a esforços de flexão, não tenha contato do disco abrasivo na área de união entre o furo e as laterais deste (área muito frágil), não exerça esforços de compressão desnecessários sobre o disco abrasivo quando operando e não exerça esforços de compressão excessivos sobre o disco abrasivo no momento que é apertado no dispositivo de montagem. O momento de torção deve ser suficiente para impedir que o disco abrasivo deslize no flange durante a operação, porém moderado a fim de não esmagar o disco abrasivo.

Como regra geral, a maioria dos discos abrasivos é montada entre flanges. O disco abrasivo é posicionado na máquina mediante seu furo. Este furo está em contato direto com o eixo da máquina. No caso de discos abrasivos com diâmetro do furo igual ou menor do que 50 mm, os flanges empregados são os tipos comuns (reto). O flange será de parafusos múltiplos, quando o disco abrasivo possuir furo com mais de 75 mm de diâmetro.

O disco abrasivo é fixado entre os flanges metálicos. Um é denominado de flange fixo (ou de encosto) e o outro, denominado não fixo ou de aperto.

2 - Flanges: os flanges são elementos essenciais de montagem do disco abrasivo na máquina. Na maioria dos casos, a quebra de um disco abrasivo, durante a operação, é causada

por flanges projetados inadequadamente ou pelo mau estado de conservação dos mesmos. As recomendações para o projeto de flanges são: forma, dimensões e necessidade de aperto

Os flanges devem ser fabricados com material pouco deformável e resistente a trincas. A NB 33 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), citada pela NORTON (1994), especifica que flanges com 250 mm de diâmetro externo ou mais devem ser de aço e todos os outros flanges, com menos de 250 mm de diâmetro externo, podem ser de ferro fundido, aço ou outro material de igual ou maior resistência e rigidez. Na prática, os flanges são geralmente feitos em aço de construção de qualidade comercial. Recomenda-se o uso de aço laminado ou forjado.

O flange fixo serve como um plano de referência para o disco abrasivo quanto está sendo montado, já que o disco abrasivo é pressionado por um dos lados do flange.

O flange deve possuir uma superfície de apoio perfeitamente plana e exatamente perpendicular ao eixo onde está posicionado. Por esta razão, e para prevenir o afrouxamento do disco abrasivo no eixo, o flange fixo deve ser firmemente fixado por chaveta, ou outro meio adequado. No caso de uma montagem mediante um flange de parafusos múltiplos, o flange fixo é solidário com o piloto e este conjunto já é enchavetado com o eixo. É fundamental, que os flanges fixo e postiço possuam o mesmo diâmetro a fim de não submeter o disco abrasivo a esforços de flexão.

Os flanges devem ser usinados nas dimensões estipuladas, com acabamento superficial adequado e balanceados. Não devem apresentar cantos vivos ou superfícies ásperas. Este requisito de balanceamento não se aplicam aos flanges de balanceamento, intencionalmente construídos não balanceados.

A NB 33, citada pela NORTON (1994), especifica que o diâmetro externo mínimo do flange deve ser igual a $1/3$ do diâmetro do disco abrasivo. É um erro supor que a segurança de um disco abrasivo em operação seja melhorada aumentando-se o diâmetro externo dos flanges. Qualquer aumento neste requer que sua espessura seja aumentada proporcionalmente. Isto aumenta o peso próprio, provocando maior custo de fabricação e os esforços dos outros elementos funcionais, em particular os mancais e eixo.

Um flange resiste à força de aperto da mesma forma que uma viga apoiada sobre dois apoios. Quanto menor a distância entre os apoios maior será a resistência à flexão. Os flanges não devem deformar-se ao serem apertados.

O aperto da porca central do eixo ou dos parafusos de fixação deve ser o mínimo suficiente para fixar o disco abrasivo. Caso contrário, a tensão provocada por este aperto poderá

danificar o disco abrasivo ou outra peça do conjunto da montagem. O torque dado ao parafuso deve ser suficientemente forte para causar uma ligeira pressão nos rótulos do disco abrasivo.

A verificação dos flanges consiste em controlar as dimensões dos mesmos, seu estado geral de conservação e sua montagem. Para assegurar que estão dentro do especificado pela NB 33, citada pela NORTON (1994), deve-se verificar as seguintes dimensões, em ambos os flanges: diâmetro externo, largura da face de apoio, profundidade do rebaixo no flange fixo e no de aperto, espessura no centro e na periferia dos flanges, planicidade da superfície de apoio, o bom estado das superfícies de apoios e diâmetro do furo do flange de aperto.

3 - Capas protetoras: são de uso obrigatório (em todo tipo de operação), devem possuir lateral desmontável (para facilitar a troca dos discos abrasivos), ser de aço ou ferro fundido maleável, possuir abertura ajustável (para compensar a diminuição do diâmetro externo do disco abrasivo). A distância máxima entre o início da abertura ajustável e o disco abrasivo é de 6 mm, com ângulo máximo de abertura (exposição do disco abrasivo), com relação à característica de operação, conforme normas NB 33, citada pela NORTON (1994), especificadas da seguinte forma:

- Operação de pedestal - ângulo máximo de abertura 90°;
- Operação de pedestal em condições especiais - ângulo máximo de abertura 125°;
- Operação cilíndrica - ângulo máximo de abertura 180°;
- Operação de corte e operação plana - ângulo máximo de abertura 150°;
- Operação pendular e portáteis - ângulo máximo de abertura 180°.

A segurança no emprego dos discos abrasivos depende das técnicas de montagem e utilização dos mesmos. As recomendações que devem ser observadas ao montar um disco abrasivo na máquina são: inspeção do disco abrasivo, inspeção dos flanges, velocidade da máquina, montagem e o aperto do disco abrasivo entre os flanges, base da máquina, apoio da peça (em máquina pedestal ou de bancada) e giro livre do disco abrasivo.

Antes de montar o disco abrasivo na máquina é necessário verificar se este não sofreu batidas no transporte, manipulação indevida, ou teve armazenamento inadequado no almoxarifado do usuário. Esta verificação pode ser efetuada mediante uma inspeção visual que

pode revelar o início de uma trinca ou qualquer partícula alheia que possa ter sido introduzida, acidentalmente, entre o disco abrasivo e o rótulo, no momento da colagem.

Outro fator que requer verificação é se o disco abrasivo pode deslizar livremente pelo seu furo sobre o eixo árvore da máquina, ou sobre a guia do flange fixo. Caso exista interferência deve-se verificar o diâmetro real do eixo árvore e do furo do disco abrasivo mediante paquímetro ou calibrador passa-não-passa. Se o furo estiver em desacordo com o solicitado, deve-se devolvê-lo ao fabricante, pois os furos nunca podem ser alterados. A tolerância para furos em discos abrasivos de precisão é H12, em discos abrasivos de desbaste é H13 e para o diâmetro dos eixos é h11. Assim, tem-se uma montagem com folga, e situada entre um mínimo que assegura, em todos os casos uma montagem precisa para evitar uma falta de circularidade e desequilíbrio excessivos. A folga desta montagem não deve ser eliminada pela expansão do eixo resultante da elevação de temperatura.

As bases das máquinas devem ser rígidas, isentas de vibrações. Para isto, devem estar assentadas em fundações adequadas.

4 - Apoio da peça: em máquinas de pedestal ou de bancada, o apoio da peça deve ser ajustável, para compensar a diminuição do diâmetro externo do disco abrasivo. A distância máxima entre o apoio e o disco abrasivo deve ser de 5 mm para evitar que a peça seja puxada entre o disco abrasivo e o apoio. A ajustagem deve ser feita com o disco abrasivo parado.

A fixação rígida da peça é um requisito essencial de operações de corte abrasivo para garantir um corte controlado e para se evitar a quebra do disco abrasivo. Em função da variedade de formas e tamanhos das peças, diferentes tipos de sistemas de fixação estão disponíveis, tanto como equipamento padrão ou opcional.

Segundo Farago (1980), versões simplificadas de morsas utilizadas em operações intermitentes consistem em um fixador do tipo parafuso, em um modelo de ajuste rápido para trabalhos repetitivos, com mordentes que forcem a peça contra uma placa colocando-a em esquadro. Para cortes diferentes de 90°, pontos fixos devem ser disponíveis para ajustar o fixador e o esquadro a 30° e 45°, ou a máquina deve ser equipada com um fixador de peças de corte angular, podendo ser ajustada em até 45°. Para peças pesadas, fixadores do tipo morsa são usados, podendo ser manuais ou automáticos, sendo o último comumente acionado hidraulicamente, e freqüentemente combinado e coordenado com o avanço hidráulico do disco abrasivo. Um exemplo é mostrado na figura 2.3.

Para evitar o desenvolvimento de rebarbas a peça deve ser fixada em ambos os lados do corte, caso contrário a parte não fixada pende antes do disco abrasivo transpassar completamente a peça. Para posicionar a peça à ação do disco abrasivo numa orientação apropriada, elementos de apoio de peças são necessários na área de fixação da máquina de corte. Com a ajuda desses apoios, peças retangulares devem ser fixadas com o lado estreito virado para o disco abrasivo, peças quadradas fixadas em uma posição onde um de seus cantos é tocado primeiramente pelo disco abrasivo, e peças circulares fixadas bem centradas em blocos “V” ou sobre roletes.

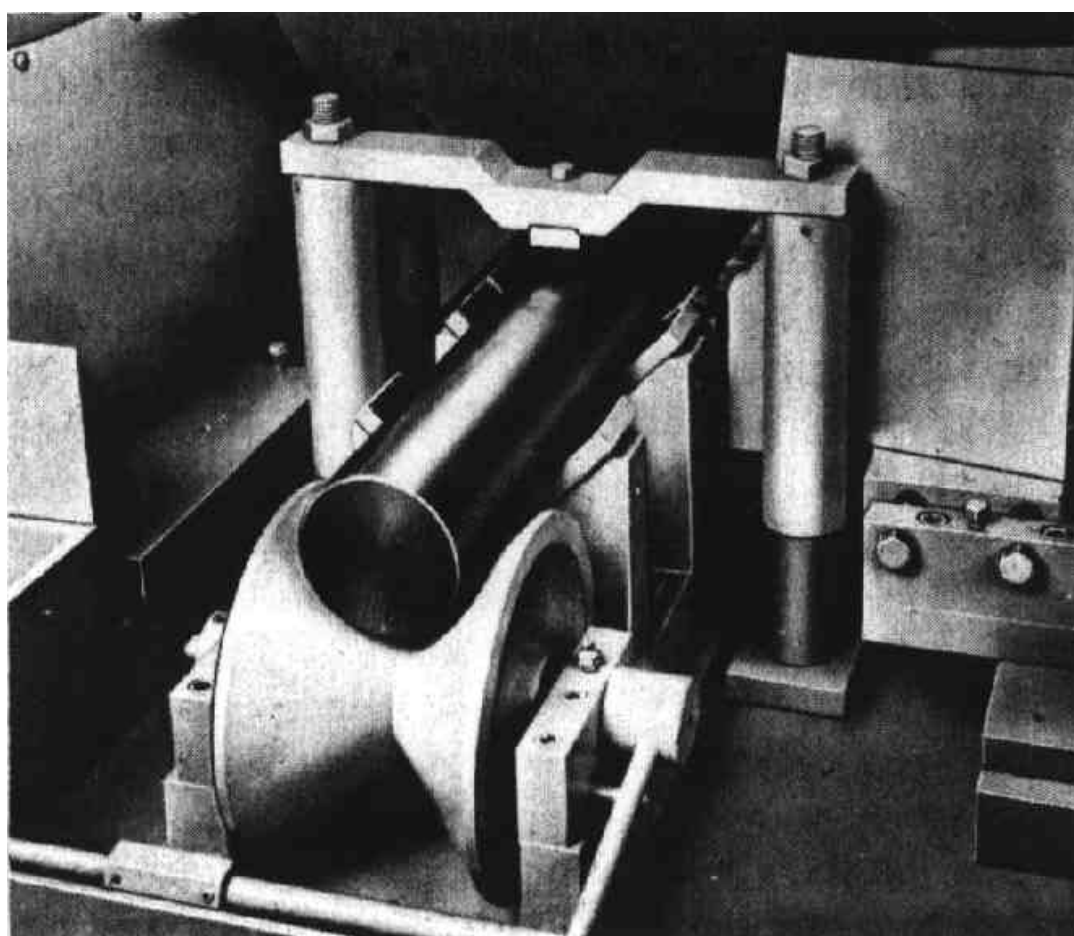


Figura 2.3: Fixador de peça para corte de barras redondas ou quadradas, apoiadas em blocos em “V” com alinhadores em aço temperado (Farago,1980).

Para cortes sucessivos de peças finais de comprimentos iguais são adaptados aos fixadores alguns limitadores ajustáveis.

A fixação de peças de formas particulares ou encurvadas deve ser feita de maneira especial, pois não pode ser apoiada em mesas planas. Peças deste tipo devem ser fixadas de tal maneira que a força de avanço do disco abrasivo não cause uma aproximação da peça sobre o mesmo. Se fosse assim, resultaria num esforço lateral, que poderia causar a ruptura do disco abrasivo.

Peças longas, que ultrapassam os limites da mesa da máquina, devem ser apoiadas em suportes adicionais, que são disponíveis com um único rolete, para peças de faces planas, ou com dois roletes em “V”, para peças circulares. O alinhamento apropriado desses apoios com a superfície livre da peça e com os acessórios de fixação da máquina de corte é muito importante. Para trabalhos repetitivos envolvendo peças longas, o uso de mesas de apoio são aconselháveis; estas são disponíveis em diferentes tamanhos e também com transportadores para apoiar, e até deslocar ou girar a peça.

5 - Armazenamento e manuseio dos discos abrasivos: todo o disco abrasivo, como qualquer outro material, possui uma resistência limitada, mas suficiente para garantir sua segurança em trabalho. Esta resistência limitada implica em se tomar precauções elementares para proteger os discos abrasivos contra impactos e para evitar sua deterioração. Baseado em experiências práticas, pode-se sugerir que os discos abrasivos devem ser manipulados com precaução para evitar impactos ou quedas no piso. Este material não deve ser rolado no piso, e caso não seja possível transportá-lo manualmente, deve-se utilizar um carrinho ou outro meio de transporte apropriado que suporte o disco abrasivo corretamente.

De forma geral os discos abrasivos devem ser armazenados onde não existam bruscas variações de temperaturas, em local seco e limpo como estantes ou prateleiras, longe de vibrações, próximo do local de consumo, em local com método de armazenamento que permita a retirada de qualquer disco abrasivo sem a necessidade de mover os discos abrasivos próximos, evitando possíveis danos, e permitindo sua utilização em ordem cronológica do seu recebimento.

Antes de armazenar e imediatamente após sua recepção, os discos abrasivos devem ser minuciosamente inspecionados para verificar que não tenham sofrido dano algum no transporte. Esta inspeção se realiza mediante um exame visual seguido por uma prova de som, que é efetuada de maneira idêntica a realizada antes de montar os discos abrasivos na máquina.

2.4 - Aspectos qualitativos dos discos abrasivos que influem na segurança

Os aspectos qualitativos referentes a segurança no trabalho com discos abrasivos são de responsabilidade do fabricante e do usuário. Neste item algumas considerações sobre estes aspectos serão apresentados.

2.4.1 - Segurança e qualidade na fabricação de discos abrasivos

A fim de se garantir a segurança e qualidade dos produtos abrasivos, deve-se proceder um rigoroso controle de qualidade, através de testes, que pode ser dividido em:

- 1 - Teste de velocidade de corte de máxima de utilização ou velocidade de máxima de utilização: no teste de velocidade máxima de utilização, os discos abrasivos são solicitados a 50% acima da sua velocidade máxima de uso. A máquina deve estar projetada de tal maneira que possa suportar a velocidade de corte desejada, particularmente com respeito aos mancais que suportam o eixo árvore. Caso o usuário modifique o projeto da máquina, a velocidade de corte máxima do disco abrasivo deverá estar dentro das especificações da NB 33. Todas as responsabilidades são do usuário, e não do fabricante do equipamento, a menos que o fabricante tenha sido consultado previamente e o mesmo tenha executado a modificação na máquina.
- 2 - Balanceamento: é a verificação da uniformidade da densidade no corpo do disco abrasivo; isto é, se seu peso está igualmente distribuído, pois quando posto em regime de trabalho, este desbalanceamento provocará esforços excessivos tanto no disco abrasivo como na máquina, podendo causar problemas sérios se algum deles não suportar o esforço.
- 3 - Tolerâncias dimensionais: verificação das tolerâncias dimensionais do disco abrasivo relacionadas às solicitadas e exigidas para a operação.
- 4 - Oscilações: verificação dos erros geométricos denominados batimento (radial e axial), e verificados de acordo com as normas técnicas.

- 5 - Testes de qualidade: visam determinar a perfeita concordância entre as especificações solicitadas e o produto fabricado.
- 6 - Outros testes: são também realizados testes para a determinação da resistência das pontes de ligação (feitas pelo ligante entre os grãos abrasivos), verificação da correta relação entre grãos, ligante, poros e densidade após a queima.

2.4.2 - Esforços atuantes sobre os discos abrasivos

Um disco abrasivo é normalmente submetido a dois tipos de esforços:

- 1 - Esforços dinâmicos, que solicitam sua resistência à tensão de ruptura. Os esforços dinâmicos resultam da força centrífuga, vibrações e impactos gerados durante o corte. Quanto menor for a dureza de um disco abrasivo, menor será a resistência do disco abrasivo aos esforços dinâmicos. Também exercem influência o seu formato e a relação entre o diâmetro externo do disco abrasivo d_s [mm] e o diâmetro do furo d [mm] do disco abrasivo.

As variações na resistência dos discos abrasivos e na resultante da força centrífuga têm conduzido à definição de velocidade máxima de funcionamento, baseada nas dimensões, formato e especificação dos discos abrasivos.

- 2 - Esforços mecânicos, que solicitam sua resistência a compressão. São exercidos por intermédio da fixação do disco abrasivo na máquina e dependem do peso do disco abrasivo, dos esforços de corte e da fixação do disco abrasivo no flange.

A estes esforços é necessário acrescentar os impactos acidentais que podem ocorrer no transporte e manuseio do disco abrasivo.

A resistência à tração e compressão de um disco abrasivo tem aproximadamente o mesmo valor. Variam dentro de limites, dependendo da matéria-prima utilizada e dos processos de fabricação. Estes valores variam também com a granulometria do grão abrasivo (tamanho médio), dureza e tipo do ligante.

No manuseio de produtos abrasivos, deve-se tomar cuidado quando são exercidas pressões mecânicas sobre estes. Por serem produtos não resilientes, não suportam esforços de flexão. São produtos heterogêneos e frágeis nas bordas. Os esforços que podem ser aplicados a um disco abrasivo são exclusivamente esforços de compressão.

Estes esforços, uma vez aplicados, não devem ser susceptíveis a aumentos ou inversões através da ação de influências perturbadoras externas. Estas influências podem ser de origem mecânica, térmica, permanentes ou acidentais.

A montagem do disco abrasivo na máquina deve ser isostática e não hiperestática, isto é, as forças atuantes na montagem devem estar perfeitamente equilibradas. Deve-se tomar cuidado para não introduzir nenhum esforço perturbador perigoso, como por exemplo folga excessiva entre o furo do disco abrasivo e o eixo árvore. Devido à elevação de temperatura do conjunto durante a operação de corte surge uma dilatação das peças metálicas. Se a folga eixo/furo não for suficiente, estas dilatações criam tensões localizadas extremamente severas que fatalmente causam a ruptura instantânea do ligante.

2.4.3 - Responsabilidade do fabricante de produtos abrasivos

A responsabilidade primordial dos fabricantes é fornecer aos usuários de discos abrasivos todas as garantias de segurança, seja qual for a velocidade de corte do disco abrasivo em funcionamento, expressa em rotações por minuto em cada produto abrasivo, mediante marcações em uma das faces ou no rótulo dos discos abrasivos.

Na prática, o fabricante deve assegurar que cada um dos produtos que entrega a seus clientes possa suportar os esforços dinâmicos que resultam da ação da força centrífuga e os esforços resultantes da operação, ou seja, o fabricante deve submeter os produtos a ensaios para verificar a sua resistência aos diferentes esforços aos quais são submetidos em curso de operação. Porém, os fabricantes se responsabilizam somente pelos esforços provenientes do processo quando este está em conformidade com as especificações feitas por ele. Os esforços provenientes de mal funcionamento da máquina de corte, ou que estejam fora dos esforços considerados inerentes do processo, podem causar falhas no disco abrasivo que não são de responsabilidade do fabricante, pois estão funcionando fora das especificações.

2.4.4 - Responsabilidade dos usuários

Os usuários devem respeitar a velocidade máxima de funcionamento indicada pelo fabricante do disco abrasivo e assumir toda responsabilidade se exceder essa velocidade limite.

A velocidade máxima de funcionamento, indicada em rotações por minuto, corresponde à velocidade de corte máxima desta ferramenta abrasiva. Sabe-se que para uma rotação específica, no eixo da máquina, a velocidade de corte do disco abrasivo diminui com a perda diametral do disco abrasivo. A diminuição na velocidade de corte resulta em um rendimento reduzido do disco abrasivo e, a fim de evitar esta perda de eficiência, algumas máquinas estão equipadas com dispositivos que permitem variar a frequência da rotação do eixo, dando à máquina recursos para manter a velocidade de corte do disco abrasivo constante ou aumentar a rotação do eixo quando o disco abrasivo se desgasta.

Deve-se considerar que a velocidade de corte máxima de um disco abrasivo não corresponde necessariamente à velocidade de corte ótima de utilização. Frequentemente obtêm-se melhores resultados com um disco abrasivo a uma velocidade de corte inferior à velocidade de corte máxima indicada pelas normas, dependendo dos parâmetros de entrada e saída estipulados.

Após a preparação do conjunto, o disco abrasivo deve girar livremente aproximadamente 10 minutos. Este giro permite um ajuste do conjunto à máxima velocidade de corte e ao mesmo tempo alivia tensões geradas na montagem.

O usuário deve manter sua máquina em excelente estado de funcionamento especialmente com respeito aos mancais do eixo, à tensão nas correias de transmissão do motor para o eixo e às capas protetoras.

Deve-se evitar realizar operações que exerçam pressões laterais sobre o disco abrasivo. Este tipo de pressão resulta em esforços de torção, que sempre são nocivos.

Os discos abrasivos devem ser montados exclusivamente por pessoa experiente que esteja perfeitamente familiarizada com os procedimentos de segurança, para evitar uma montagem errada, que pode provocar até a ruptura do disco abrasivo.

3 - FENOMENOLOGIA DO CORTE COM DISCOS ABRASIVOS

A seguir são apresentados alguns conceitos sobre os mecanismos de desgaste em discos abrasivos e um equacionamento para que os fenômenos de corte possam ser melhor interpretados. Pretende-se assim, colaborar para a formação de um embasamento teórico para que a ação das condições de corte possam ser melhor entendidas e interpretadas.

3.1 - Mecanismos de desgaste em discos abrasivos

O macro mecanismo para a geração de cavacos com ferramenta abrasiva apresenta algumas variações, se comparados com as ferramentas de geometria definida. Isto ocorre pela ação da geometria e do número de grãos abrasivos distribuídos aleatoriamente na superfície de corte dos discos abrasivos (Malkin & Ritter, 1989).

No caso do processo de corte com discos abrasivos, a espessura dos cavacos arrancados depende das velocidades de corte e mergulho. Como a velocidade de corte é substancialmente elevada, a análise da integração entre as arestas cortantes dos grãos abrasivos e a peça apresenta maior dificuldade.

Durante a operação de corte, a superfície de corte do disco abrasivo sofre a ação de três tipos de desgaste: macro desgaste, micro desgaste e desgaste térmico.

Na figura 3.1 são apresentadas as formas de ocorrência do macro desgaste e desgaste térmico da superfície de corte dos discos abrasivos.

O macro desgaste (figura 3.1a) ocorre pelo desgaste do ligante, que retém os grãos abrasivos na superfície de corte do disco abrasivo. O cavaco arrancado pela interação do grão abrasivo com o material incide ao sair, na parte do ligante que está a frente do grão abrasivo, na direção de movimento do disco abrasivo. O atrito entre o cavaco arrancado e o ligante provoca, continuamente, o desgaste do ligante e este diminui a sua capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Este mecanismo de desgaste está diretamente relacionado com as condições de corte, que podem proporcionar diferentes geometrias de cavacos. Por esta razão, pode-se minimizar (ou aumentar) o desgaste do ligante controlando-se as condições de corte.

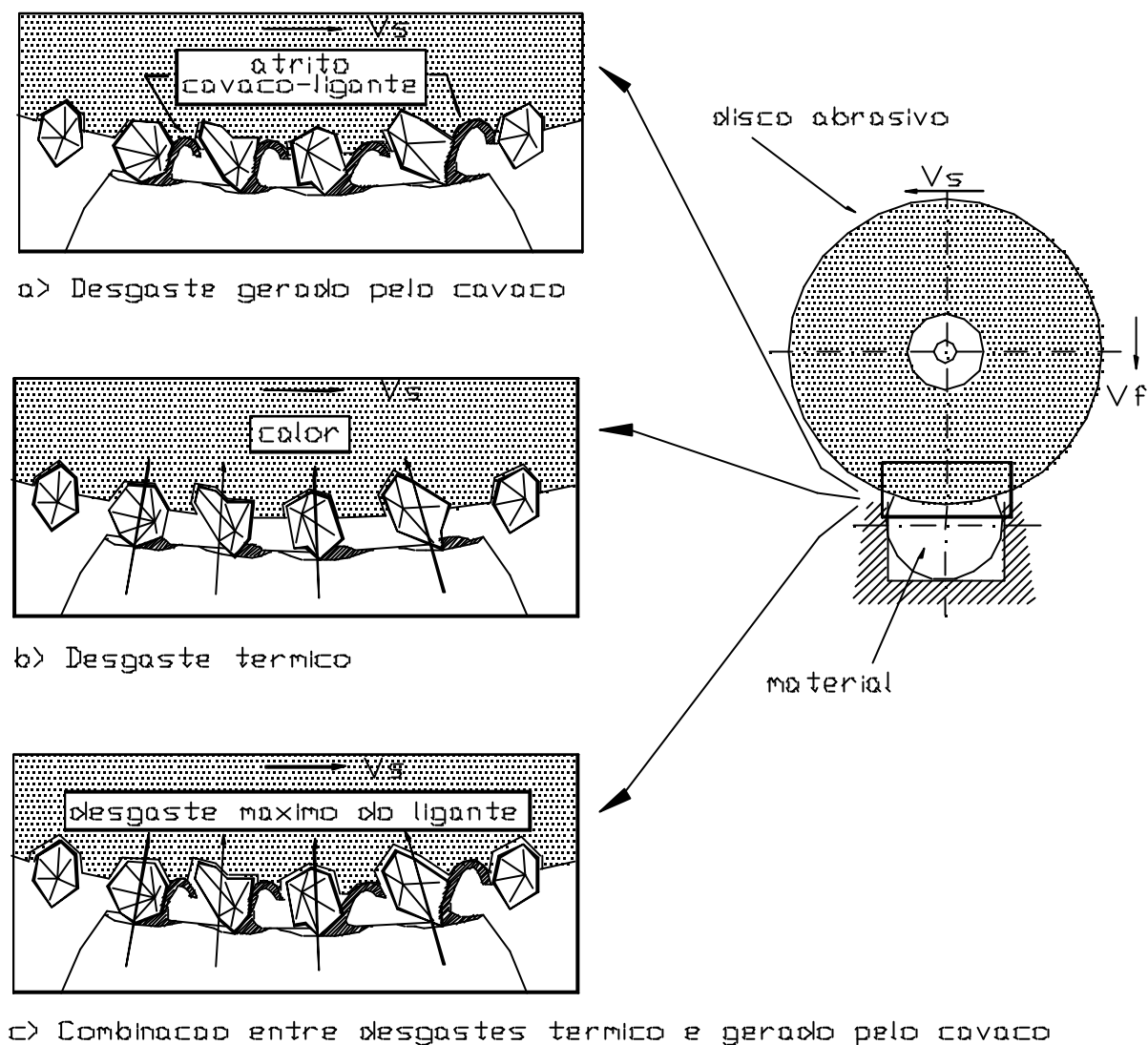


Figura 3.1: Formas de ocorrência do macro desgaste e desgaste térmico da superfície de corte dos discos abrasivos.

O micro desgaste corresponde ao desgaste das arestas ativas no topo dos grãos abrasivos durante o corte, em decorrência do atrito entre as arestas dos grãos abrasivos com o material. Durante o corte, os grãos abrasivos vão se desgastando e lentamente aumentando suas áreas de topo (áreas de contato). Isto aumenta as forças para o corte e a geração de calor.

Com o aumento da temperatura na região de contato entre o grão abrasivo e a peça, ocorre o desgaste térmico. Uma parte desta energia térmica é conduzida em direção ao centro do disco abrasivo, passando pelos grãos abrasivos e ligante. Quando a temperatura de trabalho é elevada e atua por longos períodos, há a deterioração térmica do ligante que per-

de parte de sua capacidade de retenção dos grãos abrasivos. Assim, a força máxima de retenção que o ligante exerce sobre o grão abrasivo diminui. No instante em que as forças para o corte são maiores que a de retenção do ligante sobre o grão abrasivo, há a liberação deste.

As elevadas temperaturas deterioram a fixação do grão abrasivo pelo ligante, diminuindo a força de retenção. Desta forma os grãos abrasivos desprendem-se mais rapidamente da superfície de corte do disco abrasivo, aumentando o desgaste diametral do disco abrasivo.

A diminuição da temperatura durante o corte pode ser feita com a adição de refrigeração abundante; porém, isto só é possível em alguns casos específicos.

Durante o corte ocorre a ação simultânea entre macro desgaste e o desgaste térmico (figura 3.1c). Esta combinação é danosa por ser progressiva. Quando o corte é iniciado, os cavacos vão desgastando o ligante e, simultaneamente, o topo dos grãos abrasivos desgastam-se aumentando o desgaste térmico.

3.2 - Parâmetros relacionados ao processo de corte com discos abrasivos

O processo de corte por discos abrasivos é muito sensível às condições de corte. Tendo como objetivo fornecer subsídios ao entendimento do comportamento das condições de corte que envolvem este processo, são apresentadas algumas considerações teóricas sobre a influência de cada um dos parâmetros relacionados. Será dada ênfase ao corte de materiais pelo processo de mergulho basculante por ser o processo selecionado para a realização deste trabalho.

Neste processo a peça permanece parada enquanto que o disco abrasivo, girando com velocidade de corte v_s , penetra na peça com uma determinada velocidade de mergulho v_f .

Quando a peça é cilíndrica, o comprimento de contato l_c [mm] entre o disco abrasivo e a peça é variável.

Neste item são apresentados e comentados os parâmetros de entrada que interferem no processo de corte por discos abrasivos.

3.2.1 - Influência da velocidade de mergulho do disco

abrasivo no material v_f .

A velocidade de mergulho na peça v_f [m/s] afeta a geometria do cavaco arrancado (espessura máxima teórica - h_{max}) e, consequentemente, os esforços de corte.

Pode-se analisar a influência desta velocidade de mergulho v_f na espessura máxima teórica do cavaco arrancado de duas formas, conforme apresentado na figura 3.2.

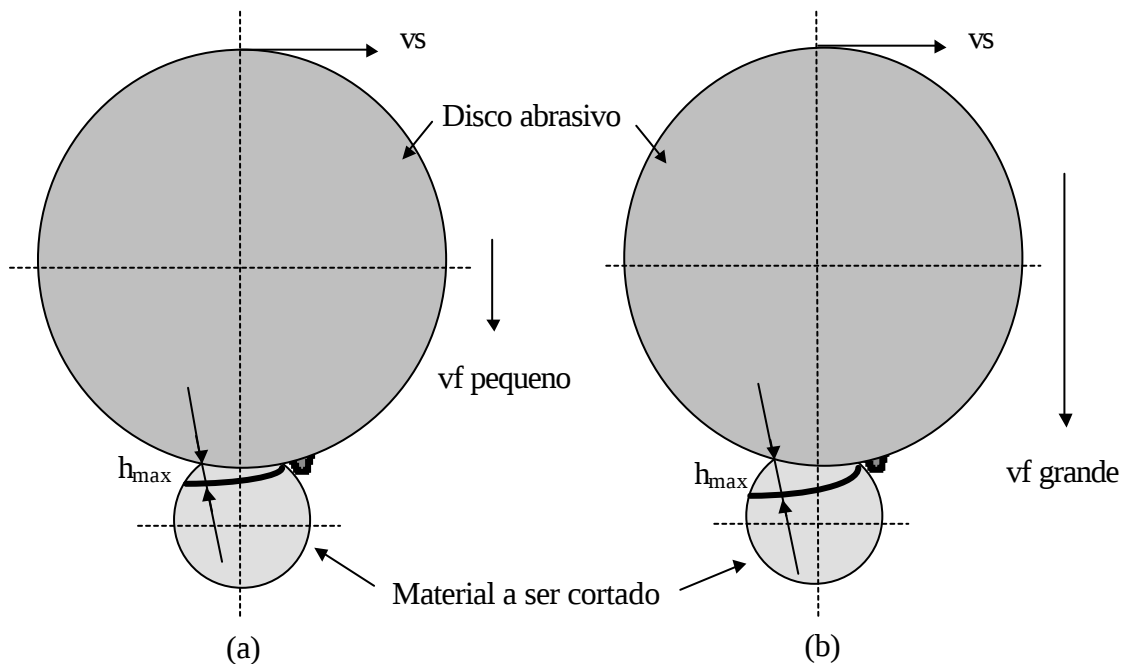


Figura 3.2: Influência da velocidade de mergulho v_f na espessura do cavaco arrancado.

a) Quando a velocidade de mergulho na peça é pequena os cavacos arrancados apresentam pequena espessura e a força tangencial de corte em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo maior (figura 3.2 a). Os grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça, o que provoca uma maior geração de calor. As forças de corte podem tender a aumentar (se não houver desprendimento dos grãos abrasivos da superfície de corte do disco) com o tempo, pelo desgaste das arestas cortantes. O tempo de corte é maior, fazendo com que o ligante fique submetido às elevadas temperaturas por mais tempo.

b) Quando a velocidade de mergulho na peça é grande os impactos dos grãos abrasivos do disco abrasivo sobre a peça são maiores. O número de grãos ativos é maior, arrancando

cavacos com maior espessura (figura 3.2 b). Consequentemente, a força tangencial de corte por grão abrasivo é maior e atua por um tempo menor.

3.2.2 - Influência da velocidade de corte do disco abrasivo v_s .

A velocidade de corte v_s [m/s] exerce uma substancial influência sobre o comportamento das forças de corte, desgaste do disco abrasivo, queima superficial da peça, vibrações da máquina, dentre outros.

Quando a velocidade de corte é elevada, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos, pelo aumento da sua frequência de contato com a peça. Portanto o número de grãos ativos é maior. A espessura dos cavacos removidos é menor, diminuindo as forças de corte e desgaste do disco abrasivo, pela menor solicitação sobre cada grão abrasivo para remover o material. Entretanto, há a elevação da temperatura na região de corte que compromete a capacidade de retenção dos grãos abrasivos pelo ligante. Isto pode antecipar o desprendimento dos grãos abrasivos da superfície de corte do disco abrasivo. O disco abrasivo apresenta uma aparente elevação da sua dureza dinâmica, já que cada disco abrasivo possui uma dureza estática característica (fornecida pelo fabricante).

3.2.3 - Influência do comprimento de contato no corte com disco abrasivo l_c

Segundo Dornfeld & Liu Bill (1993), o aumento do comprimento de contato l_c [mm] causa a elevação do número de grãos abrasivos ativos e do tempo de contato nesta região, fazendo com que cada grão abrasivo remova uma quantidade menor de material. Os cavacos arrancados são mais alongados e finos. Há uma maior parcela de atrito e riscamento entre os cavacos removidos e a peça, desde o início da formação do cavaco até sua expulsão. Desta forma, o atrito e riscamento entre os cavacos arrancados e a peça elevam a temperatura na região de corte. Isto aumenta assim como o nível de emissão acústica e as forças resultantes, pelo somatório destas parcelas.

Em operações do tipo “cut-off” por mergulho basculante, inicialmente o comprimento de contato é pontual (no corte de materiais com seções circulares) e aumenta até um valor máximo. Posteriormente decresce até ser pontual novamente. A figura 3.3 apresenta de forma esquemática a variação do comprimento de contato.

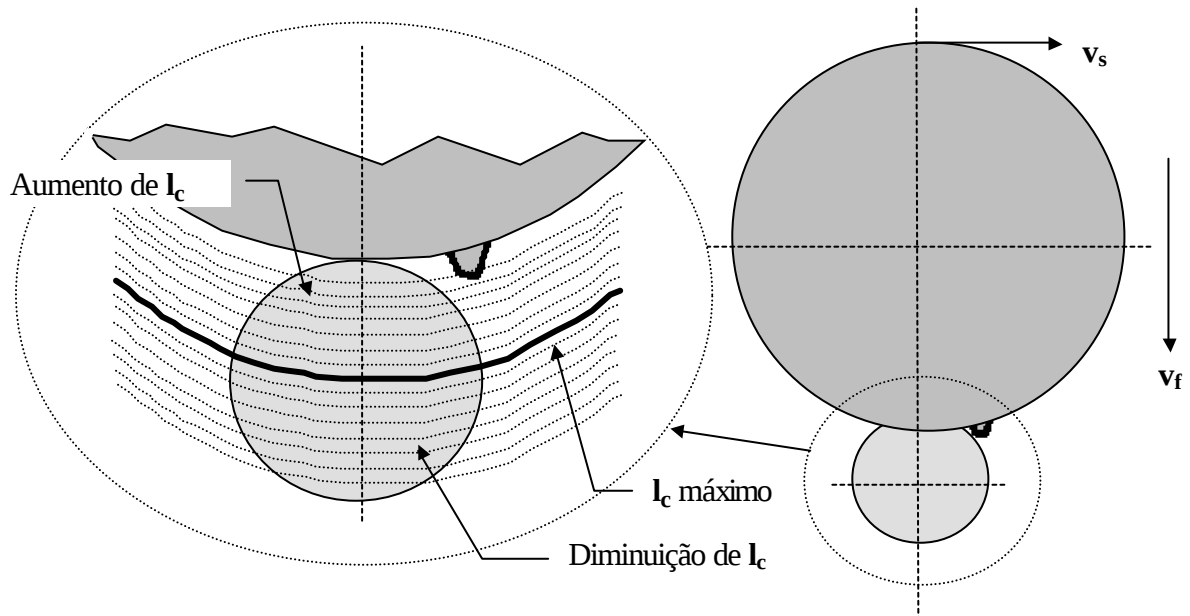


Figura 3.3: Forma esquemática da variação do comprimento de contato para o corte de seções circulares.

Durante o corte da peça, os cavacos são arrancados com diversos comprimentos de contato.

Segundo Farago (1980), quando a seção a ser cortada apresenta grandes comprimentos de contato, duas alternativas podem ser utilizadas para a sua diminuição: oscilar o disco abrasivo ou rotacionar a peça. A oscilação não depende da geometria da peça, enquanto que a rotação da peça é aplicável somente a peças de seção cilíndrica.

O corte com disco abrasivo oscilante é aplicado particularmente quando o comprimento de contato é maior do que 76 mm. Com isso, há redução do comprimento de contato decorrente da oscilação do disco abrasivo. Assim, seu desempenho aumenta pela redução do aquecimento excessivo.

O conjunto oscilante das máquinas de corte abrasivo é contrabalanceado com uma grande mola. Em equipamentos mais sofisticados, a frequência e a amplitude de oscilação podem ser ajustados para diferentes seções das peças.

O corte abrasivo rotativo é um outro método pelo qual o comprimento de corte efetivo pode ser diminuído. Consiste essencialmente em rotacionar a peça, enquanto esta é exposta ao mergulho gradual do disco abrasivo, cujos eixos (tanto do disco abrasivo como da peça) são mantidos estacionários em relação a um plano vertical. Em casos raros, o eixo do disco abrasivo é rotacionado em torno da peça estacionária. Este processo de corte é chamado de corte abrasivo planetário.

O corte rotativo é usualmente aplicado para o seccionamento de peças circulares com diâmetro maior de 200 mm. Se comparado ao corte com disco abrasivo oscilante, pode oferecer a vantagem de gerar menor calor, pela mudança contínua de área de contato, e de penetrar apenas metade do curso de corte; assim, discos abrasivos com menores diâmetros podem ser aplicados.

As vantagens do corte abrasivo rotativo são maiores quando a peça é um tubo ou cano, pois o disco abrasivo precisa penetrar na peça apenas na profundidade correspondente à espessura da parede a ser cortada.

No corte abrasivo rotativo o comprimento de contato diminui à medida que o disco abrasivo penetra mais na peça. Com isso, a velocidade periférica efetiva da peça irá reduzir. A força de corte diminui, podendo causar cegamento da superfície de corte do disco abrasivo e o aquecimento da peça. Isto pode ser evitado se a velocidade de corte for compensada.

Máquinas mais modernas eliminam essas conseqüências prejudiciais pela instalação de um controle adaptado que monitora o nível da potência durante o corte, incrementando a rotação da peça por um sistema de servo-repetição.

3.2.4 - Influência do ângulo de penetração do grão abrasivo na peça h

O ângulo com que os grãos abrasivos penetram na peça h , varia com a velocidade de mergulho e com a velocidade de corte do disco abrasivo, segundo a equação:

$$\operatorname{tg} h = \frac{v_f}{v_s} \quad (3.1)$$

A variação deste ângulo modifica a densidade de grãos abrasivos ativos na região de contato. Seu aumento faz com que ocorra a elevação da densidade de grãos abrasivos para remoção de material. Assim, mais grãos abrasivos removem material. Isto pode ser analisado, no caso do corte com discos abrasivos, das seguintes formas.

1) Quando a velocidade de corte é constante e a velocidade de mergulho variável. Neste caso, o aumento do ângulo h é causado somente pela elevação da velocidade de mergulho, conforme pode ser observado na figura 3.4.

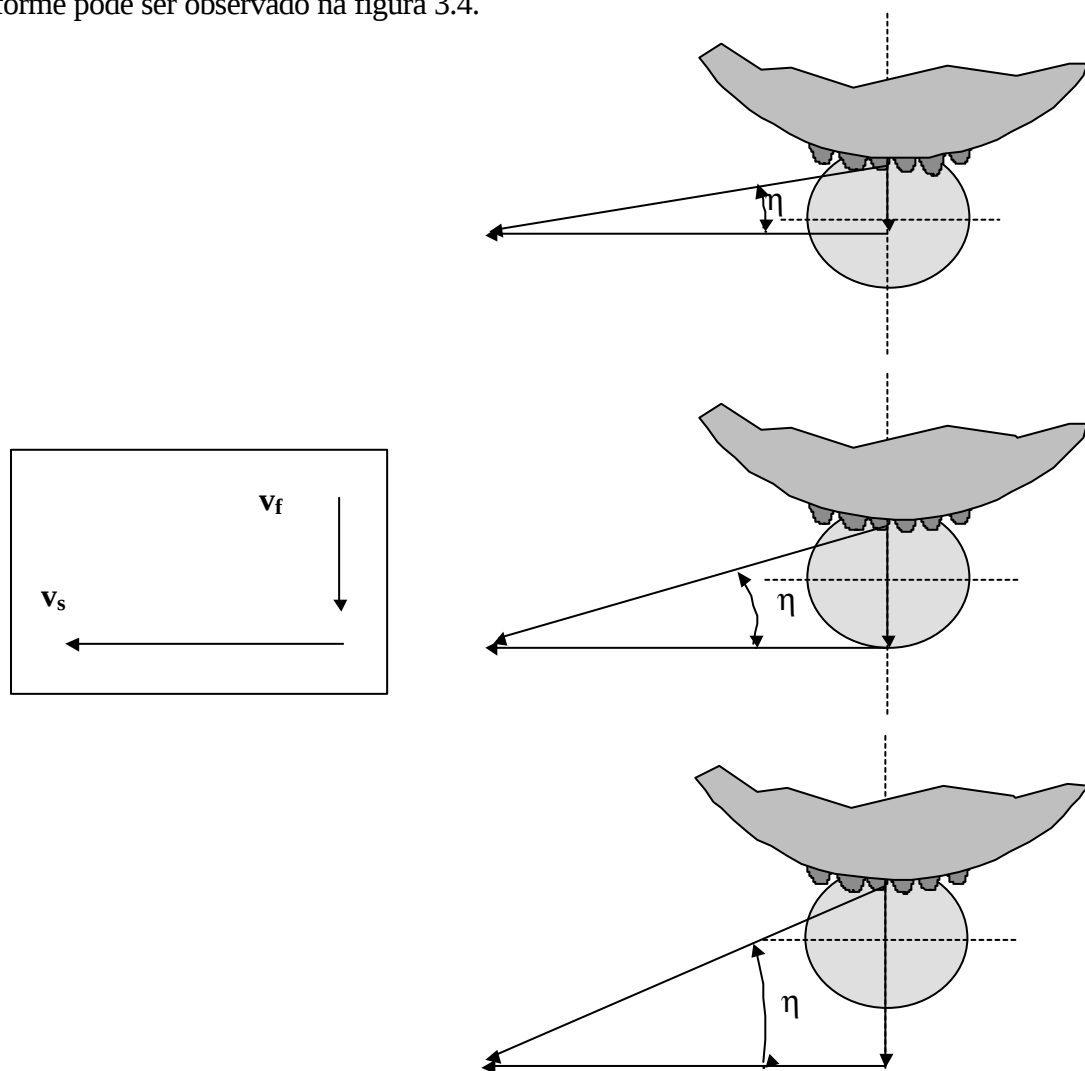


Figura 3.4: Modificações no ângulo h quando a velocidade de corte é constante e a velocidade de mergulho variável.

Pode-se notar que densidade de grãos abrasivos aumenta com a elevação da velocidade de mergulho e decresce com a perda diametral do disco abrasivo (devido à diminuição do

perímetro do disco abrasivo). Com a progressiva perda diametral, os cavacos arrancados tem suas espessuras aumentadas constantemente, pelo fato de que menos grãos removem cavacos mais espessos.

2) Quando a velocidade de corte e a velocidade de mergulho são variáveis. Neste caso, o aumento do ângulo h é causado pela elevação da velocidade de mergulho e diminuição da velocidade de corte, conforme pode ser observado na figura 3.5.

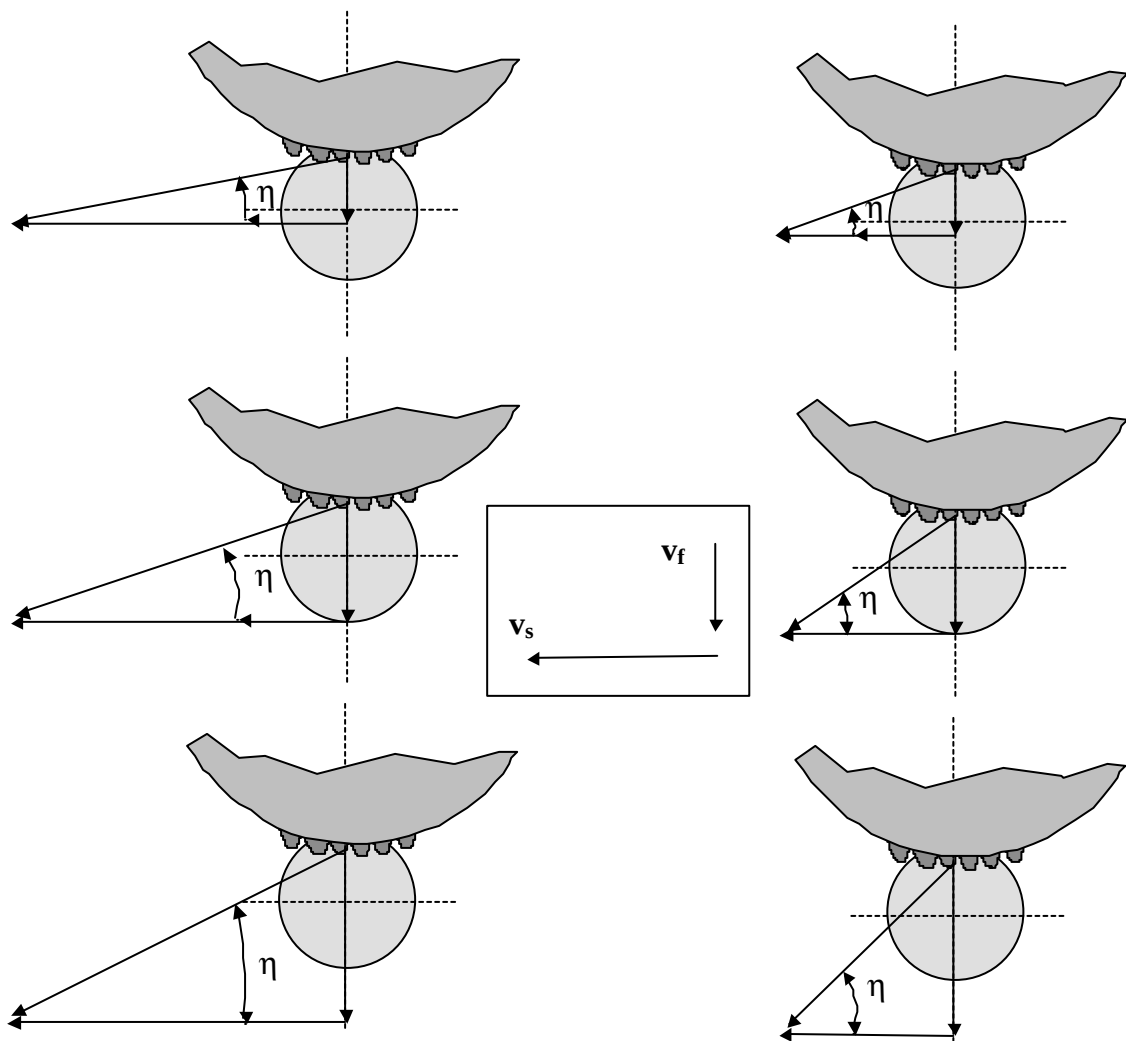


Figura 3.5: Modificações no ângulo h quando a velocidade de corte é decrescente e a velocidade de mergulho é variável.

A densidade de grãos abrasivos ativos aumenta mais rapidamente pela ação da velocidade de corte e velocidade de mergulho. Os cavacos arrancados tem suas espessuras maiores do que no caso anterior.

Quando o ângulo de penetração h é pequeno, o volume de cavacos arrancados é menor. Neste caso, uma parte considerável da energia empregada para cortar a peça é gasta com atrito e riscamento dos grãos abrasivos.

Com o aumento do ângulo de penetração h , mais cavacos são arrancados. Portanto, a maior parte da energia gasta no corte é utilizada para a remoção de material.

Na figura 3.6 é apresentada, esquematicamente, a remoção de material para pequenos ângulos de penetração (figura 3.6a) e para grandes ângulos de penetração (figura 3.6b).

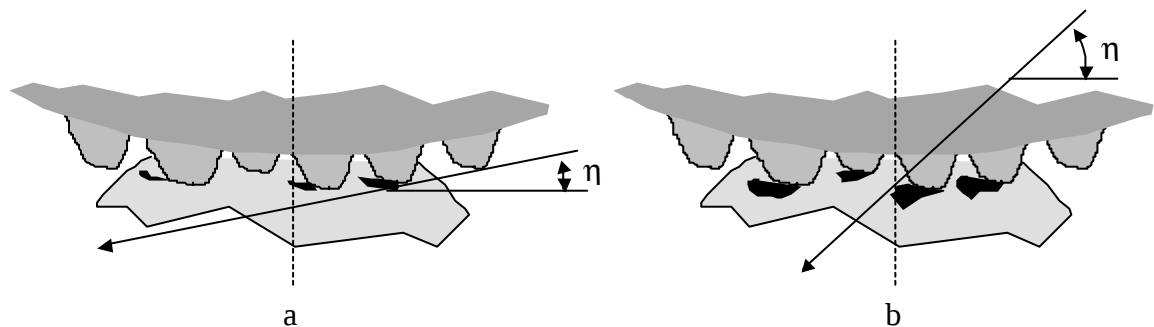


Figura 3.6: Esquema da remoção de materiais para pequenos e grandes ângulos de penetração.

A geração do cavaco arrancado, segundo Malkin (1989), é feita por uma fase de deformação do cavaco corresponde à deformação plástica sem remoção de material. Esta deformação ocorre principalmente durante o contato inicial entre um grão abrasivo e o material da peça. No início do contato, a uma baixa profundidade de corte, o material é comprimido e se deforma em direção às laterais. À medida que a extremidade de um grão abrasivo passa através da zona de corte, a profundidade de corte do grão aumenta de zero até um valor máximo. A formação do cavaco começa somente depois que a profundidade de corte alcança um valor crítico, correspondente ao início da formação do cavaco com espessura t' [mm]. Após este ponto a espessura do cavaco t [mm] tende a aumentar, até chegar no seu valor máximo que corresponde a máxima espessura do cavaco. A energia total do corte corresponde à deformação do material, formação cavaco e deslizamento entre o metal da peça e as áreas desgastadas no topo dos grãos abrasivos. Na figura 3.7 é apresentada a trajetória da ponta do grão abrasivo (figura 3.7 a) e o mecanismo de formação do cavaco de forma anular (figura 3.7 b).

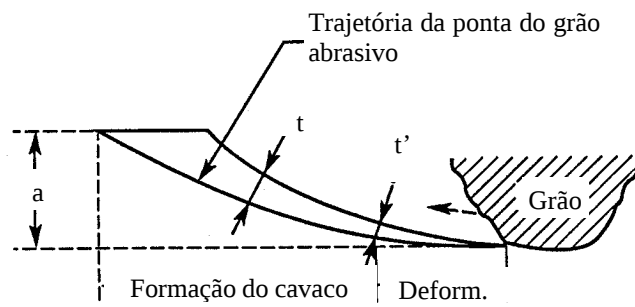


Figura 3.7 a: Ilustração mostrando a trajetória da ponta do grão abrasivo (Malkin, 1989).

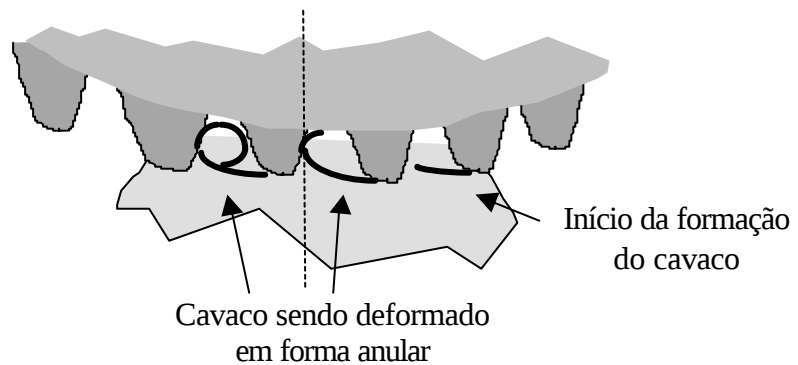


Figura 3.7 b: Mecanismo de geração do cavaco no corte com disco abrasivo.

Figura 3.7: Trajetória da ponta do grão abrasivo e a formação do cavaco na forma anular.

Pode-se notar que o cavaco tende a alojar-se nas porosidades do disco (figura 3.7 b), ocupando os espaços mais afastados pela ação do deslizamento do cavaco. Devido à ação da força centrífuga e às elevadas temperaturas os cavacos tendem a ser ocos. Evidentemente que apenas algumas geometrias dos cavacos é que apresentam este mecanismo. As outras formam cavacos de diversos comprimentos.

3.3 - Equacionamento do processo de corte com discos abrasivos por mergulho basculante

O corte de peças em operações do tipo “cut-off” consiste em pressionar um disco abrasivo contra o material a ser cortado, usualmente fixado numa morsa. Na figura 3.8 é apresentado o desenho esquemático da fenomenologia de corte com discos abrasivos para operações do tipo “cut-off” e as principais variáveis envolvidas.

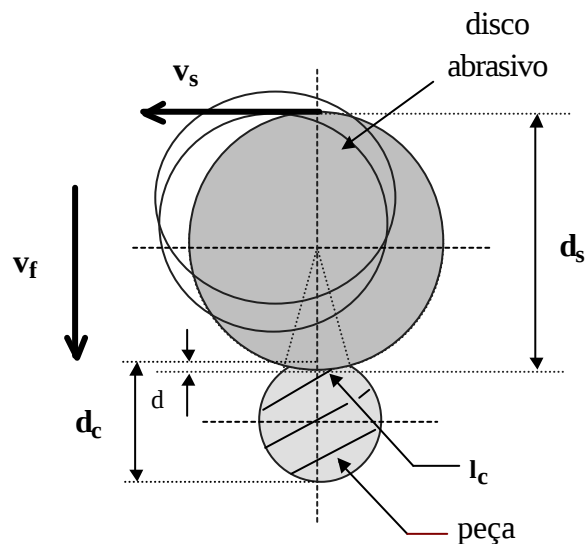


Figura 3.8: Fenomenologia de corte para operações tipo “cut-off”.

A taxa de remoção de material no tempo Q_w [mm³/s] é o volume de material removido por unidade de tempo, determinada pela equação:

$$Q_w = A \times v_f \quad (3.2)$$

onde A [mm²] é a área de contato entre o disco abrasivo e a peça no instante do corte e v_f [mm/s] a taxa temporal de penetração do disco abrasivo no material ou velocidade de mergulho.

A densidade de grãos abrasivos da superfície de corte do disco abrasivo, num determinado instante do corte, depende desta área de contato. No corte de peças com seção trans-

versal circular a área de contato varia, segundo Abrão (1991), com o diâmetro externo do disco abrasivo d_s [mm], diâmetro da peça a ser cortada d_c [mm], largura do disco abrasivo l [mm] e com a penetração do disco abrasivo na peça d [mm], conforme a equação:

$$A = 2 \times l \times \frac{d_s}{2} \times \arccos \left(\frac{\frac{d_s^2}{4} + \frac{d_c^2}{4} - d^2}{\frac{d_s^2}{4} - \frac{d_c^2}{4}} \right) \quad (3.3)$$

Há uma grande influência do número de grãos abrasivos, distribuídos ao longo do comprimento de contato l_c , na geometria e remoção dos cavacos. O comprimento de contato é obtido pela relação entre a área de contato e largura do disco abrasivo, conforme a equação:

$$l_c = \frac{A}{l} \quad (3.4)$$

Sendo a largura do disco abrasivo constante, o comprimento de contato é diretamente proporcional à área de contato. Durante o corte, esta área inicialmente tende a crescer, proporcionalmente à penetração do disco abrasivo na peça, até um comprimento de contato máximo, e posteriormente, decresce até o final do corte.

O disco abrasivo tende progressivamente a desgastar-se, diminuindo seu diâmetro externo. Isto também provoca a diminuição do comprimento de contato entre o disco abrasivo, da peça e da área de contato.

No início de uma série de cortes, quando o disco abrasivo ainda é novo, há uma maior densidade de grãos abrasivos ativos na superfície de corte deste, devido ao maior comprimento de contato. Desta forma, cada grão abrasivo remove menos material e o cavaco arrancado possui menor espessura.

O disco abrasivo desgasta-se, proporcionalmente ao volume de material removido, proporcionando a diminuição do número de grãos ativos na superfície deste. Com menor densidade de grãos ativos, cada grão abrasivo remove mais material com espessura maior, comparativamente ao caso anterior.

Para um mesmo tipo de disco abrasivo, a manutenção do número de cavacos arrancados por unidade de tempo N [nº/s] depende do número de grãos abrasivos por unidade de área C [nº/mm²] e da largura e velocidade de corte do disco abrasivo, sendo determinada pela equação:

$$N = C \times l \times v_s \quad (3.5)$$

Normalmente, o corte em operações do tipo “cut-off” é realizado por máquinas com apenas uma relação de transmissão entre o motor de acionamento e eixo árvore. Com a perda diametral do disco abrasivo, há uma diminuição contínua da velocidade de corte. Isto provoca também a diminuição contínua do número de cavacos arrancados por unidade de tempo.

A espessura equivalente de corte h_{eq} [mm] representa a espessura da camada de material que é arrancada pelo disco abrasivo numa volta completa. Trata-se de uma variável que permite quantificar uma condição de trabalho. Peters & Decneut (1975), definem a espessura equivalente de corte como sendo a relação entre a taxa de remoção específica de material no tempo Q_w' [mm²/s] e a velocidade de corte do disco abrasivo, expressa por:

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{v_s} \quad (3.6)$$

sendo a taxa de remoção específica de material no tempo Q_w' determinada pela relação entre taxa de remoção de material no tempo Q_w e a largura do disco abrasivo l . Dividindo-se a equação (3.2) por l e combinando-a com as equações (3.4) e (3.6), a espessura equivalente de corte pode ser expressa por:

$$h_{eq} = l_c \times \frac{v_f}{v_s} \quad (3.7)$$

O parâmetro h_{eq} foi escolhido para que se possa realizar uma análise comparativa dos resultados entre as duas condições de trabalho (v_s constante e v_{si} decrescente).

A espessura teórica máxima do cavaco $h_{\max}$ [mm] é diretamente proporcional ao parâmetro espessura equivalente de corte, conforme a equação (Bianchi et al., 1992):

$$h_{\max} = h_{eq} \times \frac{2 \times L}{l_c} = 2 \times L \times \frac{v_f}{v_s} \quad (3.8)$$

onde L [mm] é o espaçamento médio entre os grãos abrasivos.

Portanto, aumentando-se v_f ou diminuindo-se v_s há um aumento na espessura máxima do cavaco arrancado. Todavia, variando-se a espessura do cavaco arrancado, altera-se a força tangencial de corte num grão abrasivo F_{tc1g} [N]. Esta força tangencial de corte é ser expressa pela equação (Bianchi, 1992):

$$F_{tc1g} = b \times h_{\max} \times K_s + m \times b \times p \times \frac{K_n}{4} \quad (3.9)$$

sendo b [mm] a largura média do topo dos grãos abrasivos, K_s [N/mm²] a pressão específica de corte, m o coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e a peça e K_n [N/mm²] a tensão de escoamento do metal da peça.

Outro parâmetro utilizado para a determinação do desempenho de discos abrasivos é a relação G [--], definida por (Hahn, 1971) como sendo a relação entre volume de material removido e de disco abrasivo gasto (ferramenta), determinada pela equação:

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (3.10)$$

sendo V_w e V_s [mm³], os volumes de material removido e volume de disco abrasivo gasto, respectivamente.

Esta relação caracteriza o desgaste de um disco abrasivo sob determinadas condições de trabalho. Se o desgaste do disco abrasivo for grande, com relação ao desgaste de material, a relação G é pequena. Isto significa que a perda volumétrica do disco abrasivo é grande. Assim, o custo total do corte é maior. No caso do disco abrasivo desgastar-se lentamente, a relação G é alta, sendo o desempenho do disco abrasivo melhor, tornando o corte mais econômico.

4 – DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

Com o objetivo de se estudar o comportamento de discos abrasivos, em operações do tipo “cut-off” por mergulho basculante, submetidos a diferentes condições de corte, é necessária uma pesquisa experimental onde as condições de corte devem ser modificadas e as variáveis de saída medidas.

Para a evolução segura do trabalho e garantia de resultados confiáveis, foi determinada uma metodologia detalhada para a execução dos ensaios.

A seguir são apresentadas informações de ordem geral relativas à esta experimentação:

4.1 - Metodologia

Para a realização deste trabalho, as atividades realizadas foram divididas em várias etapas. A seguir, são apresentadas informações de ordem geral para tais etapas:

- desenvolvimento de um banco de ensaio constituído de três partes: computacional e eletrônica para monitorar as variáveis do processo e mecânica, responsável pelo processo de seccionamento, que posteriormente serão detalhadas;
- realização de ensaios preliminares para verificação do funcionamento do banco de ensaios e a determinação das condições de corte para a realização dos ensaios;
- realização dos ensaios definitivos, variando-se as condições de corte, para a verificação do comportamento dos discos abrasivos;
- análise e discussão dos resultados obtidos.

Mais detalhes sobre cada etapa serão apresentados mais adiante.

4.2 - Grandezas de entrada, saída e do sistema

Os parâmetros de entrada utilizados neste trabalho são: velocidade de corte (constante e decrescente), velocidade de mergulho, um tipo de disco abrasivo (AR302) e dois tipos de materiais (ABNT 1020 e ABNT 1045).

As variáveis de saída são: força tangencial de corte, tempo de corte e relação **G**.

As grandezas do sistema são: características da máquina e temperatura gerada durante os cortes.

5 - PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA EXPERIMENTAÇÃO

Neste capítulo são descritos todos os procedimentos relativos ao banco de ensaios, ensaios preliminares e sequenciamento dos ensaios experimentais para a avaliação do comportamento de discos abrasivos submetidos a diversas condições de corte.

5.1 - Descrição do banco de ensaios

Para a realização de ensaios experimentais, fez-se necessária a construção de um banco de ensaios relativamente complexo, composto por três partes com funções definidas. A parte eletrônica faz a interligação da parte mecânica com o microcomputador. A parte computacional transforma os dados recebidos pela parte eletrônica e fornece os resultados que posteriormente serão comparados. A parte mecânica é responsável pelas operações de corte.

A seguir será apresentada uma breve descrição das partes e uma explicação sobre o funcionamento de cada uma delas.

5.1.1 - Parte eletrônica

Para a medição da força tangencial de corte diversos métodos tradicionais, como torquímetros, dinamômetros, dentre outros, são utilizados dependendo da aplicação desejada. Tais equipamentos não são recomendados no presente trabalho pelas severas condições ambientais. Assim, optou-se pelo desenvolvimento de uma forma alternativa de medição da força tangencial de corte, que permitisse a realização deste trabalho.

Um circuito eletrônico foi desenvolvido pelo Prof. M.Sc. Paulo Roberto de Aguiar do Departamento de Engenharia Elétrica da FET, baseado nas necessidades de se transformar os valores de corrente elétrica, tensão e rotação do motor em sinais de tensão, para serem enviados à uma placa de aquisição de dados A/D. A figura 5.1 mostra a fotografia deste circuito eletrônico.

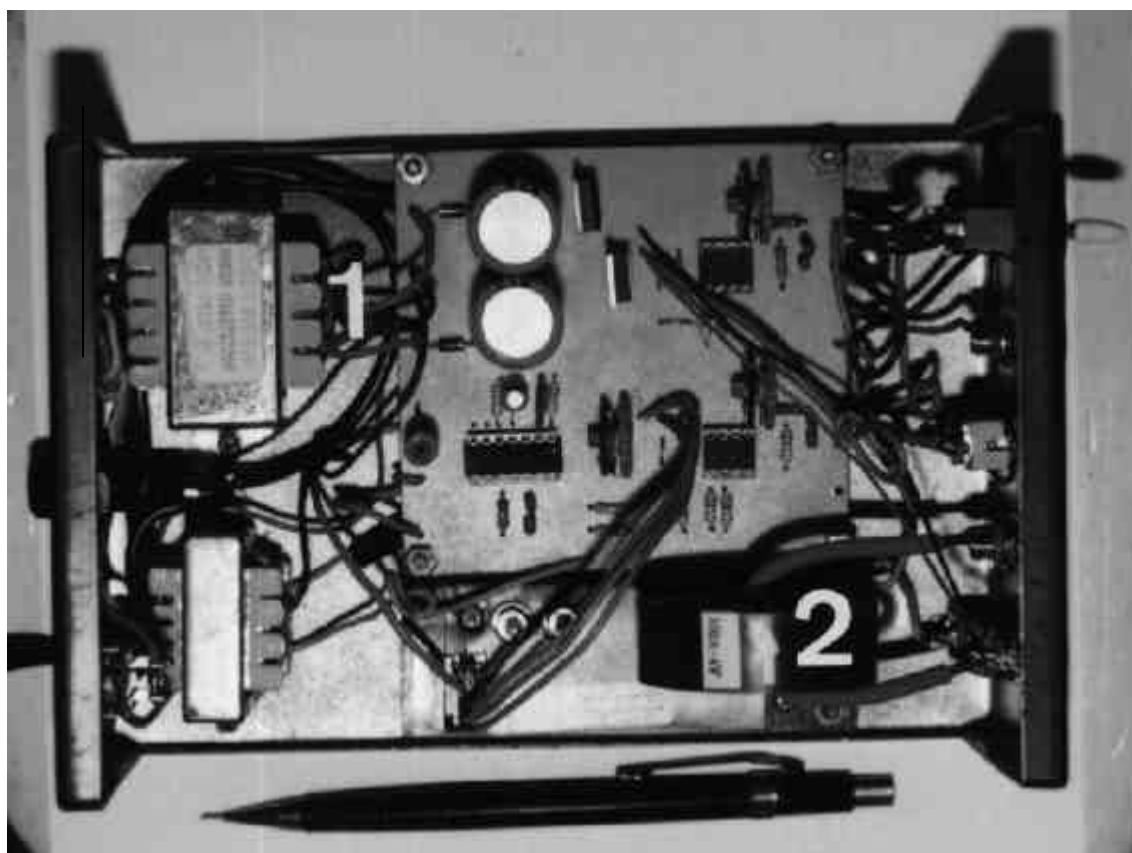


Figura 5.1: Fotografia do circuito eletrônico.

1. transformador abaixador de tensão; 2. sensor de efeito Hall.

Um dos elementos principais deste circuito é o sensor de efeito Hall. Este sensor, quando ligado em série com o motor, mede a corrente elétrica que o alimenta, e a transforma em sinal de tensão, que posteriormente é enviada à placa de aquisição de dados.

A tensão de alimentação do motor é medida a partir de um transformador abaixador de tensão. Este é ligado em paralelo com o motor. Posteriormente, os sinais de tensão, proporcionais à tensão do motor são enviados para a placa de aquisição de dados.

Os valores de tensão proporcionais à corrente e à tensão elétricas aplicadas sobre o motor, são multiplicados (ainda no circuito eletrônico) por um “chip” específico. Assim, há no circuito eletrônico uma saída de tensão proporcional a potência elétrica P_e [W] solicitada pelo motor. A calibração desta potência foi realizada com a alimentação do circuito eletrônico por potências elétricas crescentes e conhecidas (com a utilização de lâmpadas), e medida a tensão de saída do circuito eletrônico. Com estes dados foi feita a uma equação de

calibração, que é utilizada pelo “software”. Assim, a tensão de saída do circuito eletrônico (que é enviada ao microcomputador) representa a potência elétrica solicitada pelo motor.

O circuito eletrônico também é responsável pela medição da rotação do eixo do motor que é feita por um “encoder”.

O princípio de funcionamento do “encoder” baseia-se na medida da quantidade de pulsos elétricos por unidade de tempo, através de sensores fotoelétricos. Um disco metálico ranhurado gerador de pulsos é iluminado de um lado por um sistema emissor de luz, sendo que esta luz é recebida, do outro lado do disco metálico, por um sistema receptor, que registra os pulsos e os transmite a um circuito lógico (este faz parte do circuito eletrônico) que detecta a quantidade de sinais emitidos e produz os impulsos de medição.

A vantagem deste tipo de medição é que não existe contato mecânico. O sistema de medição fotoelétrico necessita da combinação de vários componentes eletro-eletrônicos, sendo muitos deles bastante frágeis e sensíveis a condições adversas de utilização, como por exemplo choque mecânico, temperaturas elevadas, excesso de iluminação.

Optou-se por utilizar um disco metálico com 60 ranhuras para a obtenção da rotação direta através de um frequencímetro, uma vez que a rede possui 60 Hz de frequência.

Os sinais provenientes do “encoder” (sinais digitais) são transformados, através do circuito eletrônico, num sinal analógico e este é registrado pela placa de aquisição de dados, enviados para o microcomputador e manipulados pelo “software”.

Neste caso também foi feita a calibração da tensão de saída do circuito eletrônico em função da frequência do “encoder”. Na figura 5.2 é apresentado o esquema do conjunto “encoder” - disco metálico ranhurado.

A obtenção da rotação do disco abrasivo é feita pela multiplicação da rotação do motor pela relação de transmissão.

O cuidado especial tomado na confecção do circuito eletrônico foi o de não enviar para a placa de aquisição tensões que excedessem a faixa $\pm 5V$ (máxima tensão de leitura da placa).

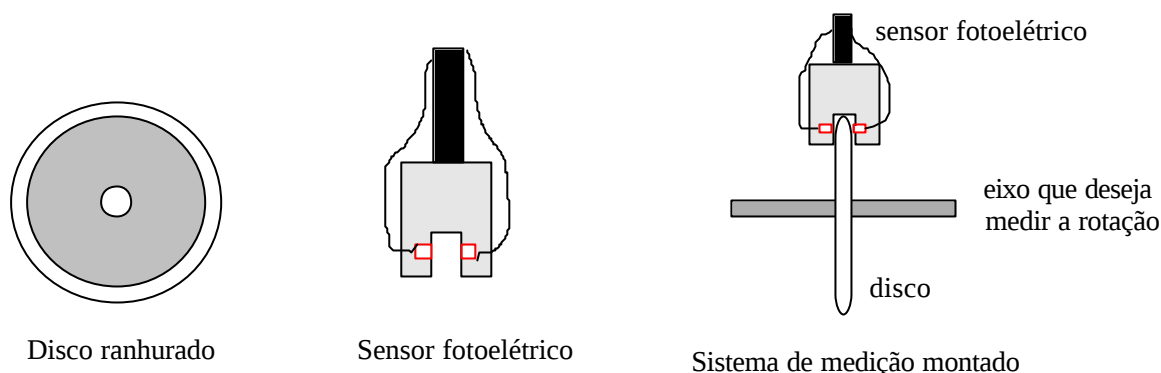


Figura 5.2: Esquema do conjunto “encoder” - disco metálico ranhurado.

5.1.2 - Parte computacional

O “software”, desenvolvido no compilador Turbo Pascal 7.0, tem como objetivo principal tratar as informações dos ensaios, transformá-las em dados comparáveis e arquivá-las para uma posterior consulta ou algum outro tratamento que se faça necessário.

As opções que o “software” permite são:

- Aquisição : a parte principal do “software”, que faz o gerenciamento dos ensaios e armazenamento de todos os dados;
- Consulta : parte responsável por fazer a consulta dos dados dos ensaios já realizados;
- Imprimir : parte responsável por imprimir os dados e os gráficos dos ensaios já realizados;
- Deletar : parte responsável por deletar os arquivos com os dados de ensaios que não são mais necessários;
- Sair : finaliza o “software”.

A opção aquisição será descrita por ser fundamental para o entendimento de como a força tangencial de corte é medida.

Quando esta opção é solicitada, alguns dados devem ser fornecidos no início do ensaio, tais como:

- Tipo do disco abrasivo - neste campo deve-se digitar o tipo do disco abrasivo, para facilitar a sua consulta;
- Material da peça a ser cortada - neste campo deve-se digitar o material da peça a ser cortada, e também especificações que julgar importante tais como têmpera, revenido, cementação e outros;
- Largura do disco abrasivo - deve ser digitado o valor da largura do disco abrasivo em milímetros;
- Diâmetro externo da peça - deve ser digitado o valor do diâmetro da barra a ser cortada, em milímetros, pois serão cortados sempre materiais cilíndricos para facilitar a aquisição dos corpos de prova e de se manter uma uniformidade dos mesmos, evitando resultados diferenciados pela sua geometria;
- O valor da velocidade de mergulho - neste trabalho foram usados três valores.

Depois de preenchidos estes campos uma nova tela, com a opção de se verificar a velocidade de corte, é apresentada. O ajuste da velocidade de corte é feito pela variação da frequência do motor (de acordo com o diâmetro do disco abrasivo), responsável pela rotação do disco abrasivo, com o auxílio de um inversor de frequência.

Após a conclusão desta etapa, o “software” está em condições de iniciar a medição da velocidade de corte.

A medição da velocidade de corte, em tempo real, é feita pela aquisição dos valores de rotação do eixo do disco abrasivo, provenientes do “encoder”, de acordo com a equação:

$$v_s = p \times d_s \times n \quad (5.1)$$

Neste caso, o diâmetro externo do disco abrasivo foi inserido, via teclado, no “software”, restando apenas o valor da rotação do eixo do disco abrasivo n [rad/s] para a determinação da velocidade de corte. Os registros da rotação do eixo do disco abrasivo e da velocidade de corte são feitos constantemente durante os ensaios.

Posteriormente, o “software” registra os valores de tensão, referentes à potência elétrica necessária para acionar o motor.

Com os valores de potência elétrica, rotação do eixo do disco abrasivo e diâmetro externo do disco abrasivo, obtém-se o valor da força tangencial de corte F_{tc} que é determinada pela equação:

$$F_{tc} = \frac{2 \times P_e}{d_s \times n} \quad (5.2)$$

Para o usuário é disponível no monitor somente os valores de força tangencial de corte. Desta forma, as explicações que se seguem tratam dos procedimentos que foram realizados para a aquisição de dados, a partir da força tangencial de corte.

Inicialmente, é determinado o valor da força tangencial de corte instantânea em vazio F_{tciv} [N] (que corresponde as resistências passivas), que é feito com o disco abrasivo na rotação em que será realizado o ensaio. Esta é a força necessária apenas para rotacionar o disco abrasivo. O “software” faz a leitura de duzentos pontos da F_{tciv} , calcula a média destes valores e a apresenta como um ponto gráfico no monitor. Este ponto é denominado de força tangencial de corte em vazio F_{tcv} [N]. Isto é feito até que toda a tela do monitor esteja preenchida com estes pontos. Posteriormente, é determinada a força tangencial de corte média em vazio F_{tcmv} [N], realizando-se a média aritmética dos pontos registrados na tela. O preenchimento de pontos em toda tela é feito para que se tenha um número de pontos suficientes para a determinação de um valor confiável da força tangencial de corte média em vazio.

Após a medição da F_{tcmv} tem início a medição da força tangencial de corte total instantânea F_{tcti} [N], que é feita com o disco abrasivo cortando a peça. Como neste trabalho desejava-se avaliar a força tangencial de corte média F_{tcm} , esta é medida da seguinte forma:

Da força tangencial total instantânea F_{tcti} é subtraído o valor a força tangencial de corte média em vazio F_{tcmv} . Assim, é determinada a força tangencial de corte instantânea F_{tci} [N], conforme a equação:

$$F_{tci} = F_{tcti} - F_{tcmv} \quad (5.3)$$

O “software” faz a leitura de duzentos pontos da F_{tci} , calcula a média destes valores e a apresenta como um ponto gráfico no monitor. Este ponto é denominado de força tangencial de corte F_{tc} , sendo medida durante todo o corte. No final de cada corte, é feita a média dos valores de F_{tc} , sendo determinado o valor da força tangencial de corte média F_{tcm} relativa ao corte. Na tela do monitor é traçada uma reta que representa este valor em função do número de cortes.

Este procedimento é feito para os cortes sucessivos, até que o décimo corte seja concluído. Neste momento o “software” utiliza um “loop” que têm como objetivo a interrupção momentânea do ensaio para a nova medição do diâmetro externo do disco abrasivo, correção da velocidade de corte (caso seja desejável) e determinação da nova força tangencial de corte média em vazio F_{tcmv} .

Posteriormente, o ciclo de ensaios continua até que o disco abrasivo alcance o diâmetro externo final estipulado para ensaio ou haja o travamento de disco abrasivo.

5.1.3 - Parte mecânica

A função básica da parte mecânica do banco de ensaios é garantir a execução dos ensaios propriamente ditos, envolvendo os discos abrasivos, os materiais a serem cortados e as condições de corte que se pretende ensaiar.

Uma parte elétrica adicional tem como funções ativar os motores da parte mecânica e variar a rotação dos mesmos (modificando assim as condições de velocidade de corte e velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça).

Na figura 5.3 é apresentado o esquema da parte elétrica adicional, juntamente com o espaço de trabalho disponível.

A porção mais importante da parte elétrica adicional situa-se dentro do Laboratório de Usinagem por Abrasão, junto da parte eletrônica e da parte computacional, com o intuito de se evitar o contato com a fuligem, resultante do próprio processo de corte com disco abrasivo. Esta é composta de dois inversores de frequência, sendo um de 2,5 cv e outro de 7,5 cv (indicações 1 e 2 da figura 5.3), que alimentam o motor de avanço e o motor que aciona o disco abrasivo respectivamente.

Para cada inversor há uma chave magnética que liga o circuito (indicação 3 da figura 5.3). Ambos os circuitos estão protegidos por fusíveis (indicados pela letra “F” na figura 5.3) devidamente instalados e disjuntores.

Na parte externa do laboratório, e junto com a parte mecânica, estão localizadas estrategicamente a chave de acionamento do motor, que aciona o disco abrasivo, e a chave acionadora e inversora do motor de avanço. Estas chaves também estão fixadas na parede localizada fora da área de perigo para realização do experimento.

A parte mecânica do banco de ensaios, utilizada neste experimento, é composta basicamente de dois sistemas e de uma estrutura de simples funções.

O primeiro sistema envolve a operação de corte propriamente dita, que é executada pela máquina de corte de mergulho basculante, do tipo “cut-off”, acrescida de algumas adaptações a serem discriminadas adiante. O segundo sistema diz respeito ao avanço automático e constante de mergulho do disco abrasivo. O acionamento é feito por um motor independente daquele que aciona o disco abrasivo, proporcionando, assim, uma maior possibilidade de variações para os ensaios.

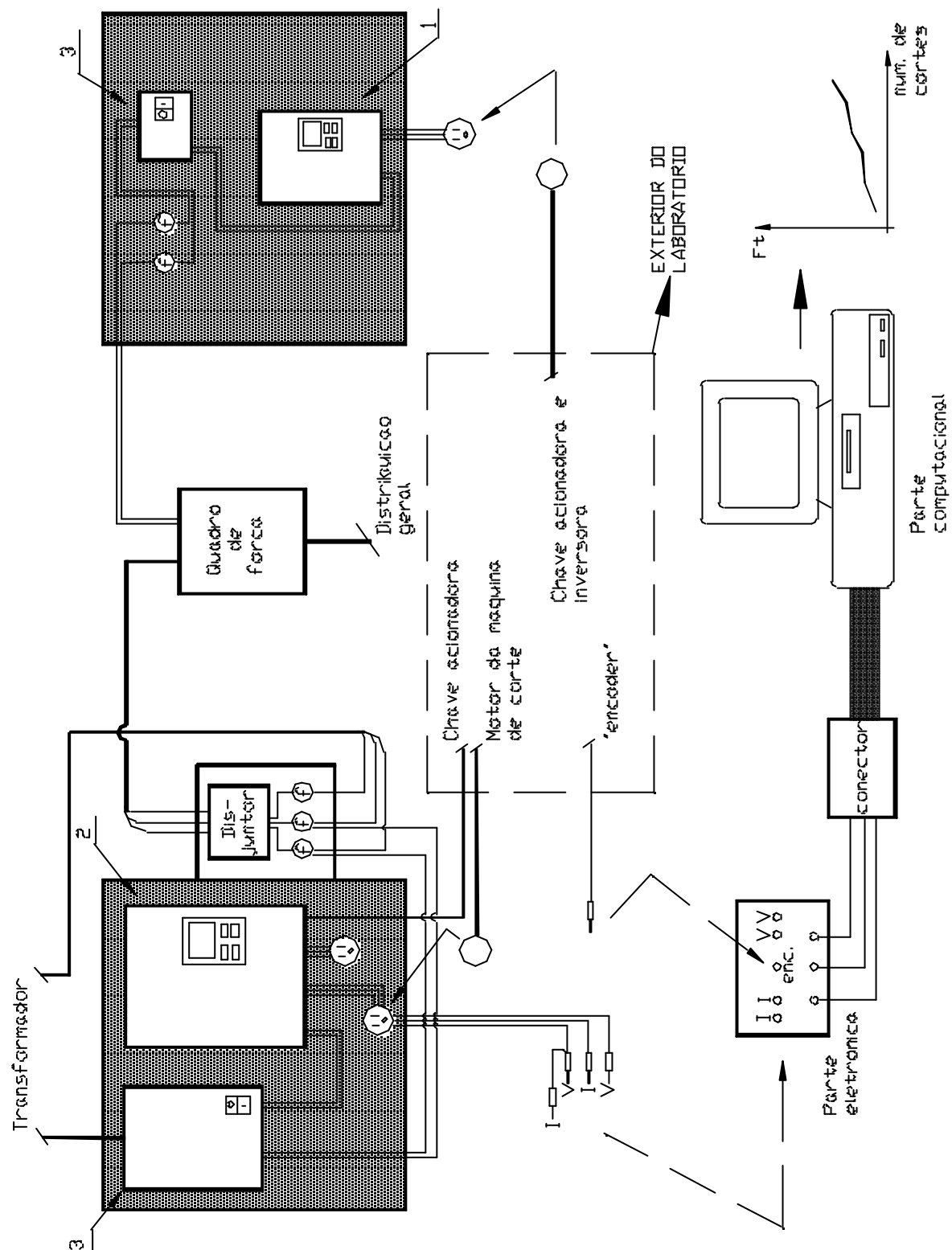


Figura 5.3: Esquema da parte elétrica do banco de ensaios.

Um sistema de transmissão por polias atua como um grande redutor, diminuindo a rotação proveniente do motor. Um inversor de frequência controla a rotação deste motor, permitindo a determinação da velocidade de mergulho mais adequada. Este sistema poderia ser simplificado aplicando-se um motor de menor rotação ou com a adaptação de um redutor sem-fim. Porém, o projeto ficaria excessivamente oneroso.

A robusta estrutura, que acondiciona estes dois sistemas, é construída de perfis “L” e chapas de aço, unidos por parafusos, porcas e/ou solda. Para garantir um baixo nível de vibração do conjunto, suficiente para não comprometer os ensaios, esta estrutura foi fixada ao solo (cimentado), através de parafusos chumbados no mesmo.

Na figura 5.4 é apresentada uma fotografia do perfil da máquina, mostrando os dois sistemas.

Para uma melhor descrição da parte mecânica do banco de ensaios, esta pode ser dividida em cinco níveis.

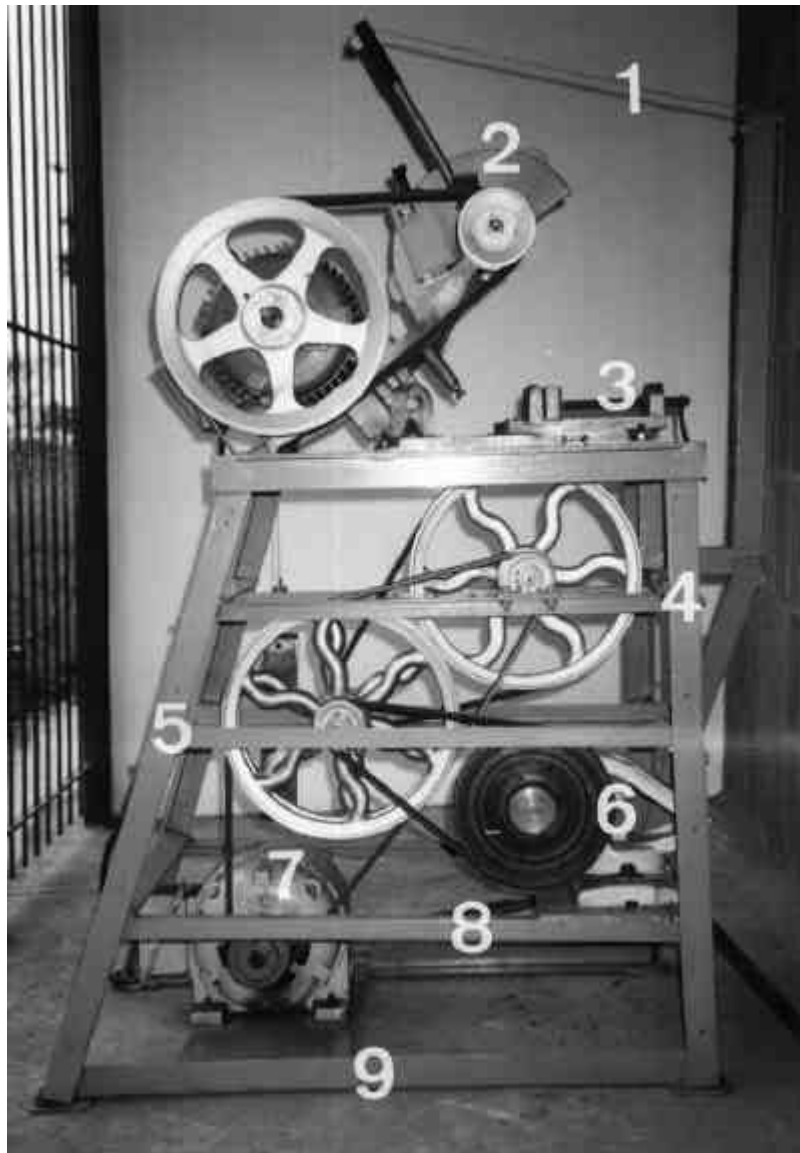


Figura 5.4: Vista lateral da estrutura mecânica (níveis).

1. cabo de aço; 2. máquina de corte; 3. nível 5 (topo); 4. nível 4; 5. nível 3; 6. cabeçote; 7. motor responsável pela velocidade de mergulho do disco; 8. nível 2; 9. nível 1 (base).

- **Nível 1 (base):**

O motor de corrente alternada de 2,5 cv e 1.735 rpm a 60 Hz, responsável pelo avanço de mergulho do disco abrasivo, é fixado sobre uma chapa espessa, a qual está soldada nos perfis de aço da base da estrutura. Esta chapa possui rasgos oblongos, por onde os parafusos de fixação podem deslizar antes de serem fixados, permitindo o esticamento da correia, ao se deslocar o motor ao longo dos mesmos.

Acoplada ao eixo deste, está uma polia de ϕ 80 mm que transmite o movimento a uma polia, existente no nível 3.

- **Nível 2:**

Na região frontal da estrutura, sobre uma chapa grossa soldada na mesma, está fixado um cabeçote de elevada rigidez. Esta característica é muito importante para que não ocorram oscilações nos valores da velocidade de mergulho do disco abrasivo.

Numa das extremidades do eixo do cabeçote está acoplada uma polia de ϕ 200 mm, como pode ser observado na figura 5.5.



Figura 5.5: Detalhe da polia do cabeçote e transmissão.

1. polia do cabeçote; 2. cabeçote.

Na outra extremidade do cabeçote existe um tambor roscado externamente cujos flancos acomodam o perfil do cabo de aço, conforme pode ser observado na figura 5.6. Ao girar, este tambor enrola ou desenrola o cabo, aproximando ou recuando, conseqüentemente, o disco abrasivo da peça.

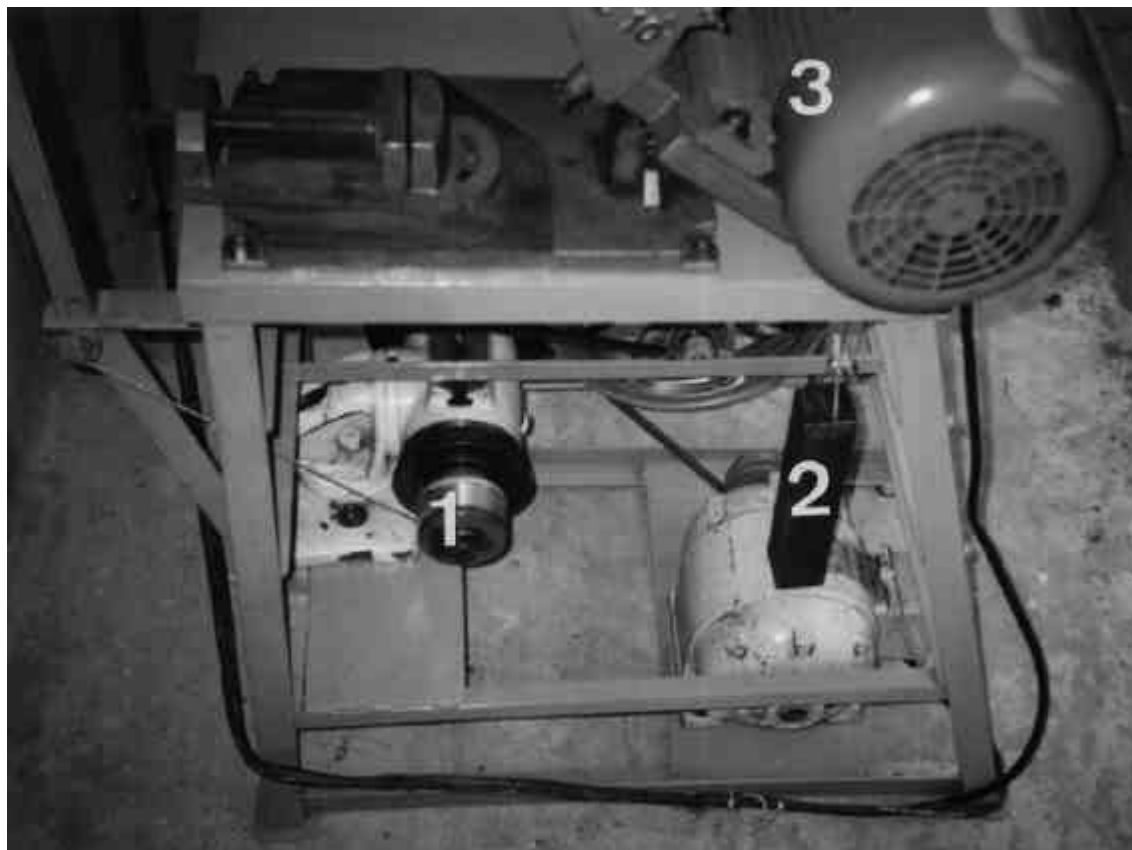


Figura 5.6: Detalhe do tambor, cabo de aço, contrapeso e motores.

1. tambor; 2. contrapeso; 3. motor acionador do disco abrasivo.

- **Níveis 3 e 4:**

Nestes dois níveis tem-se uma seqüência de polias intermediárias responsáveis pela elevada redução da rotação proveniente do motor.

No nível 3 um eixo escalonado fixo em mancais estacionários sustenta dois pacotes idênticos, simétricos e independentes de duas polias cada. Estas duas polias são unidas entre si por parafusos, e giram simultaneamente sobre mancais de rolamento instalados em seus cubos.

A construção do eixo do nível 4 é semelhante ao eixo do nível 3, e sustenta somente duas polias unidas por uma bucha espaçadora.

Na figura 57 é apresentado o esquema de transmissão das polias dos eixos dos níveis 3 e 4, através de um corte executado neste conjunto pela linha que une os centros dos eixos.

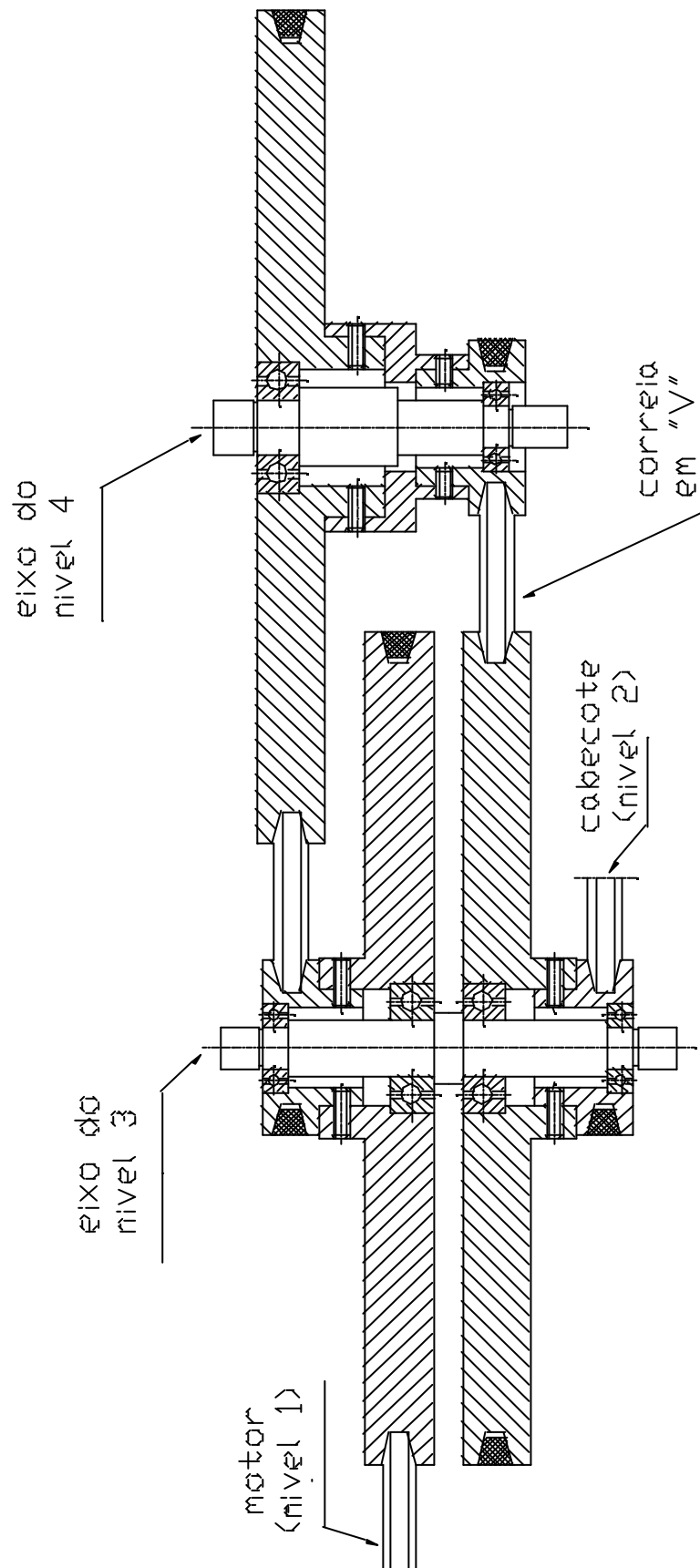


Figura 5.7: Esquema de transmissão das polias dos eixos dos níveis 3 e 4.

Portanto, as polias dos níveis 3 e 4 podem ser chamadas de intermediárias, tendo como função reduzir substancialmente a rotação do motor, a fim de resultar num avanço linear mais adequado do disco abrasivo sobre a peça.

Resumidamente, tem-se a seguinte seqüência de transmissão:

1. Polia do motor (ϕ 80 mm) do nível 1 para polia do nível 3 do pacote da direita (ϕ 300 mm), em relação à vista frontal do banco de ensaios. Assim, obtém-se uma relação de transmissão $i_1 = 1:3,75$.
2. Através da união, entre a polia maior e a menor (ϕ 60 mm) do nível 3, esta movimenta-se e aciona a polia maior (ϕ 300 mm) do nível 4. Logo, $i_2 = 1:5$.
3. Pela união feita através da bucha espaçadora, entre a polia maior e a menor (ϕ 60 mm), esta movimenta-se e aciona a polia maior (ϕ 300 mm) do nível 3 do pacote da esquerda. A relação de transmissão é idêntica à anterior, ou seja, $i_3 = 1:5$.
4. Como existe outra união, a polia menor (ϕ 60 mm) do nível 3 aciona a polia do cabeçote do nível 2 (ϕ 200 mm), resultando em $i_4 = 1:3,3$.
5. O eixo do cabeçote faz com que o tambor gire a 5,6 rpm (com o motor a 60Hz), enrolando o cabo de aço que, através das duas pequenas roldanas, aciona a alavanca de avanço da máquina de corte, mergulhando o disco abrasivo sobre a peça.

Portanto, a redução total foi de 1:309,4.

- **Nível 5:**

É o topo da parte mecânica, onde uma chapa de aço espessa é soldada na parte superior da estrutura que serve de base para a máquina de corte e o motor de acionamento do disco abrasivo, sendo também o local onde as barras são fixadas e seccionadas.

O motor de corrente alternada que aciona o disco abrasivo possui 7,5 cv de potência e gira a 3.490 rpm a 60Hz. Em seu eixo estão adaptados um “encoder” (para leitura da rotação do eixo) e uma polia de dois canais. Inicialmente esta polia possuía diâmetro de 300 mm. Com a realização de alguns ensaios preliminares verificou-se a necessidade de se trocar esta polia por uma outra com diâmetro 184 mm. Com isto, o torque disponível para a realização dos cortes foi aumentado. Este motor aciona o disco abrasivo através de uma polia de ϕ 100 mm, conjugada ao mesmo por meio de um pequeno cabeçote, resultando numa relação de transmissão $i=1,84:1$. Desse modo, o disco abrasivo gira, em condições extremas, a 6.420 rpm.

Como o disco abrasivo trabalha sempre com elevadas rotações, a máquina de corte dispõe de uma capa protetora que o envolve parcialmente, oferecendo maior segurança ao usuário.

Parafusada ao cabeçote do eixo do disco abrasivo existe uma haste, que avança ou recua o conjunto móvel da máquina de corte. Em sua extremidade superior está preso o cabo de aço responsável pelo seu deslocamento. O cabo de aço chega até a haste através de duas pequenas roldanas instaladas na parte dianteira da estrutura mecânica.

Quando a máquina de corte está em posição de descanso (inoperante), o motor serve como contrapeso para manter o cabo de aço esticado; mas ao se iniciar o corte, principalmente se o disco abrasivo estiver com diâmetro externo reduzido, o motor passa do ponto de equilíbrio e começa a pressionar o corpo de prova, além da pressão resultante do avanço automático, impedindo que o disco abrasivo recue no fim do corte, que é o momento de se inverter o sentido do avanço.

Para evitar tal inconveniente, adaptou-se um contrapeso adicional ao motor, de maneira que a máquina de corte sempre mantenha a tendência de ficar recuada, esticando o cabo de aço (figura 5.6).

O ambiente de ensaios ou espaço de trabalho, onde os corpos de prova são presos na morsa presente na base da máquina de corte para serem ensaiados pode ser verificado na figura 5.8.



Figura 5.8: Detalhe da máquina de corte e espaço de trabalho.

1. cabo de aço; 2. haste; 3. polias; 4. morsa.

A parte mecânica do banco de ensaios fica localizada numa área coberta e protegida com grades, externa ao Laboratório de Usinagem por Abrasão, principalmente por motivos de segurança e proteção do operador e dos equipamentos presentes na parte interna do mesmo.

O processo de corte por disco abrasivo emite fuligem que, além de prejudicar os equipamentos, é extremamente nocivo ao sistema respiratório. Assim justifica-se o trabalho ao “ar livre” para não prejudicar o operador.

Como o sistema de avanço (transmissão de redução, motor e polias) não é inerte à fuligem, foi desenvolvida uma proteção para a região inferior da estrutura mecânica. Chapas delgadas de aço recortadas para tampar as laterais foram parafusadas nos perfis verticais da estrutura a fim de satisfazer esta necessidade.

Para garantir uma boa vedação e redução das vibrações dessas proteções (e consequentemente o ruído), guarnições de borracha foram coladas nas chapas.

Como as polias de acionamento do disco abrasivo giram a rotações elevadas, uma proteção de chapas de aço foi confeccionada para garantir maior segurança ao usuário.

A parte mecânica protegida do banco de ensaios pode ser visualizada nas figuras 5.9 e 5.10.



Figura 5.9: Composição geral da estrutura.



Figura 5.10: Banco de ensaios protegido.

5.2 - Ensaio preliminares

Nesta etapa, o banco de ensaios foi testado quanto à sua funcionalidade e confiabilidade. Suas diversas partes foram testadas e encontradas suas limitações, em termos dos valores máximos e mínimos capazes de serem medidos. Também foram determinados os valores ideais para os parâmetros de entrada e variáveis de saída, uma vez que os equipamentos utilizados, (máquina de corte, motores de acionamento e circuito condicionador de sinais) possuem suas limitações, que devem ser respeitadas antes de se determinar os valores para a experimentação.

O procedimento utilizado para a realização dos ensaios preliminares é descrito a seguir.

Um disco abrasivo foi fixado no eixo árvore da máquina e o material a ser cortado foi fixado numa morsa. Após a realização de um corte, o material era posicionado para a realização do próximo corte, sucessivamente até que o ensaio fosse finalizado.

Os fios de conexão, que “trazem” os valores de tensão e corrente elétrica provenientes do motor de acionamento do disco abrasivo, foram então conectados ao circuito condicionador de sinais, que por sua vez foi conectado à placa A/D, instalada no microcomputador. O “software” foi instalado no microcomputador, para que fosse possível realizar a aquisição de dados durante o corte.

Foram realizados dois ensaios para a verificação do funcionamento do “software” e do circuito eletrônico. Também as demais funções do “software” foram testadas de maneira semelhante. Esta etapa foi demorada até que se adquirisse familiaridade com os procedimentos e funcionamento do programa e dos principais componentes do banco de ensaios. Partiu-se então para a determinação das condições de corte a serem ensaiadas definitivamente.

Nas figura 5.11 e 5.12 são apresentados dois resultados obtidos nos ensaios preliminares.

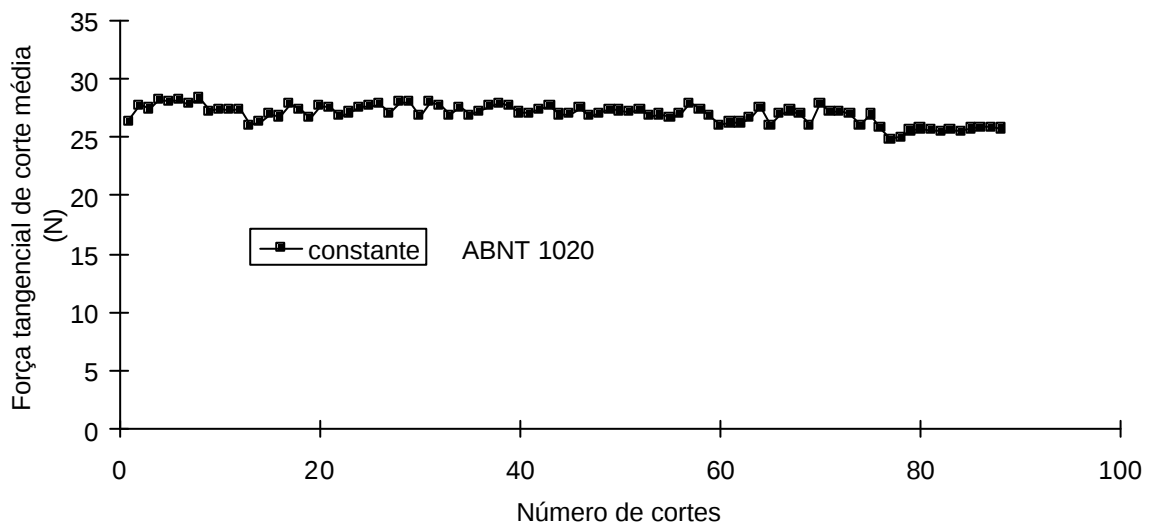


Figura 5.11: Resultados do primeiro ensaio preliminar para a verificação do funcionamento do “software”.

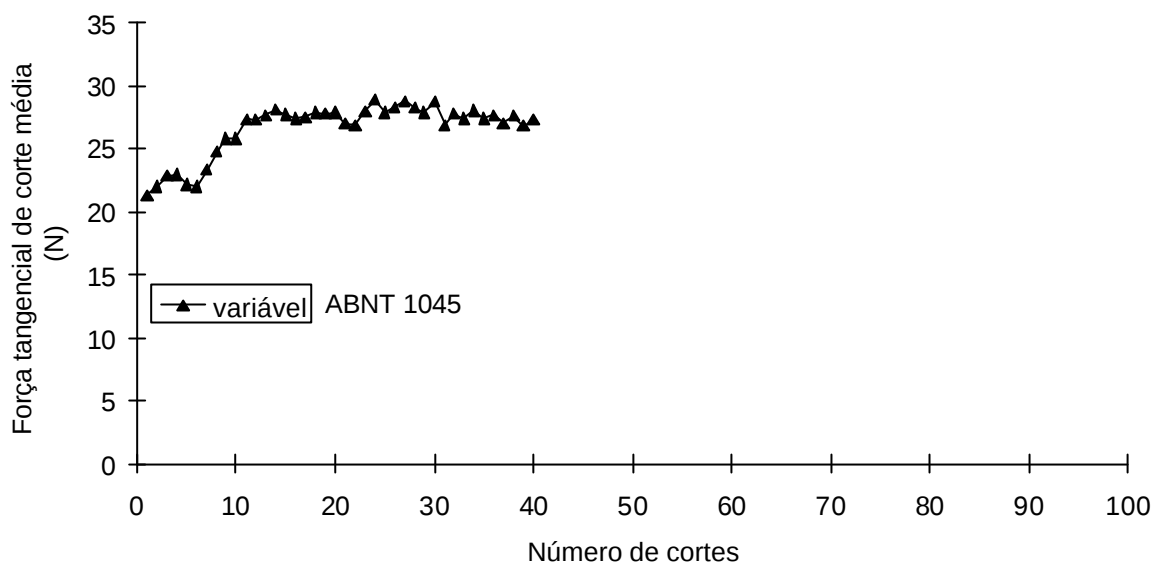


Figura 5.12: Resultados do segundo ensaio preliminar para a verificação do funcionamento do “software”.

A parte mecânica necessitou de pequenas adequações, tais como: a haste responsável pela fixação das roldanas, por onde desliza o cabo de aço que imprime a velocidade v_f , apresentava pouca rigidez. Assim, quando o disco abrasivo era submetido a maiores esforços de corte, esta fletia comprometendo os resultados de força tangencial de corte. Desta forma, optou-se por inserir um reforço que aumentou sensivelmente a rigidez da haste.

A relação de transmissão entre a polia do motor de acionamento do disco abrasivo e a polia do eixo árvore que suporta o disco abrasivo proporcionava uma redução significativa da potência mecânica disponível no eixo árvore. Isto ocorreu pela necessidade de valores elevados de rotação do eixo árvore, que deveria aumentar com a perda diametral do disco abrasivo quando utilizava-se velocidade de corte constante. Assim, optou-se por trocar a polia do motor de acionamento por uma outra de diâmetro menor. A relação de transmissão passou de 3:1 para 1,84:1.

No anexo 1 é apresentado o resultado típico de um ensaio.

As alterações realizadas, reforço na haste e troca da polia do motor de acionamento, são apresentadas na fotografia da figura 5.13.

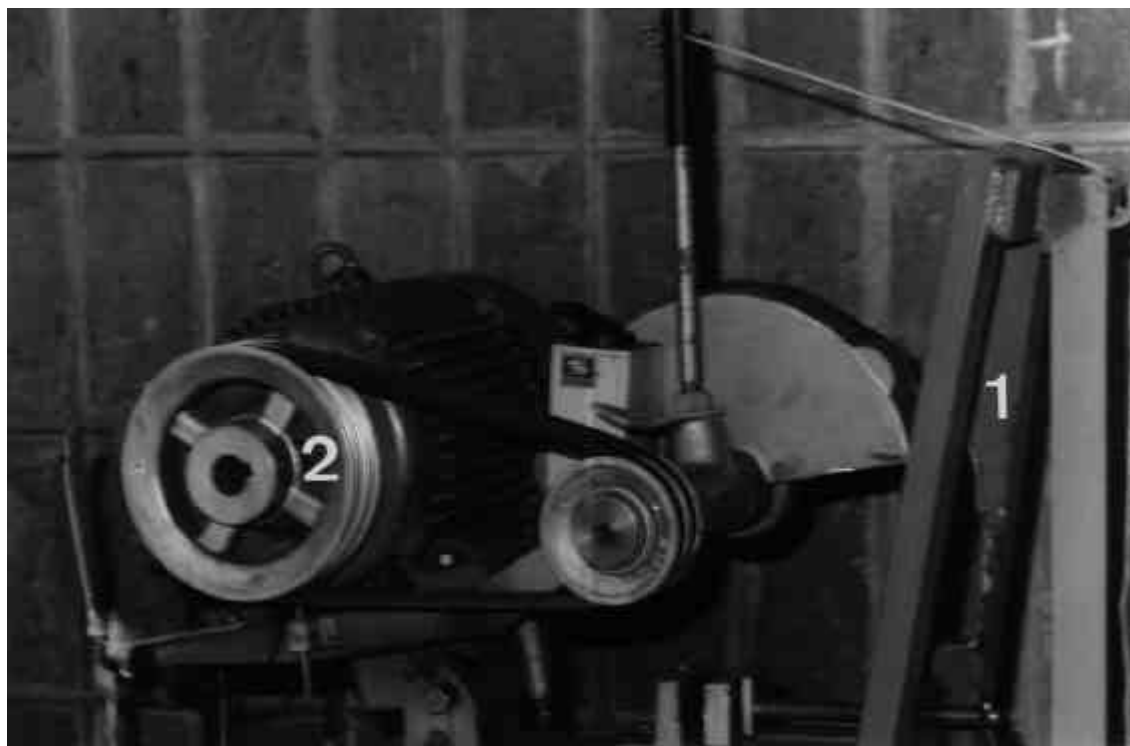


Figura 5.13: Fotografia mostrando as alteração realizadas.

1. tirante de reforço; 2. polia modificada.

Além destas adequações, a realização dos ensaios preliminares permitiu a correção do procedimento da medição da perda diametral do disco abrasivo. Inicialmente o disco abrasivo era retirado, a cada dez cortes, do eixo árvore do disco abrasivo para a medição do seu diâmetro externo. Quando o disco abrasivo era recolocado no eixo árvore, para a continuação do ensaio, este ficava deslocado, pela folga existente entre o furo do disco abrasivo e o diâmetro do eixo, fazendo com que o disco abrasivo apresentasse um batimento radial significativo. Consequentemente, os impactos eram elevados e provocavam o lascamento da superfície de corte. Após esta constatação optou-se pela medição indireta do diâmetro externo do disco abrasivo com um paquímetro, compasso externo e uma escala.

Na etapa seguinte destes ensaios preliminares, diversos outros ensaios adicionais foram realizados com diferentes valores de v_s e v_f , medindo-se a força tangencial de corte. Foi possível então determinar-se os limites aceitáveis destas que pudessem representar os fenômenos de corte. Porém, alguns detalhes adicionais serão apresentados mais adiante.

5.3 - Escolha dos materiais e discos abrasivos utilizados

Segundo Snee (1991), os ensaios que envolvem discos abrasivos devem ser o mais abrangente possível e em operações que sejam largamente utilizadas.

Desse modo, os discos abrasivos ensaiados foram os do tipo “serralheiro”, fabricados pela empresa NORTON Indústria e Comércio S.A., particularmente interessante neste trabalho, que são utilizados na maioria das aplicações, principalmente pelo seu baixo custo e vida longa.

Os materiais a serem seccionados devem ser similares aos que são encontrados nas serralherias, ou seja, aços-carbono estruturais. Para efeito de comparação, foram avaliados dois tipos desses aços: um de baixo (ABNT 1020) e o outro com maior teor de carbono (ABNT 1045). Estes materiais foram escolhidos por serem os mais utilizados no corte com o tipo de disco selecionado, segundo a empresa NORTON.

Na tabela 5.1 são apresentadas as especificações dos materiais e do disco abrasivo a serem experimentados.

Segundo a empresa NORTON (1994), a especificação do disco abrasivo utilizado (AR302) mostra que o grão abrasivo é de óxido de alumínio (A), ligante resinóide (R) e com duas telas (2). O código 30 é de controle interno da empresa. Este disco abrasivo é fabricado com grãos de óxido de alumínio marrom e com uma combinação de grãos com granulometria 20 e 46 mesh, para a obtenção de custo e desempenho desejados pelo mercado. Juntamente com o ligante resinóide são acrescentados enchimentos ativos, como por exemplo pirita. Embora não esteja indicada a sua dureza na especificação, trata-se de um disco abrasivo duro.

As dimensões principais dos discos abrasivos utilizados nos ensaios de seccionamento são apresentados na figura 5.14.

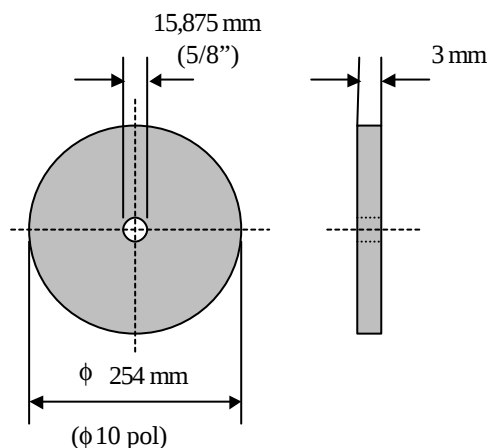


Figura 5.14: Dimensões principais do disco abrasivo utilizado (sem escala).

5.4 - Definições dos ensaios

Neste trabalho, a realização dos ensaios tem como objetivo o estudo do comportamento de discos abrasivos através da obtenção de dados experimentais, para uma melhor análise do comportamento da força tangencial de corte e do desgaste do disco abrasivo, em função de diversas condições de corte.

Como nenhum dos trabalhos pesquisados com discos abrasivos previu valores orientativos de força de corte, velocidade de mergulho e tempo de desgaste do disco abrasivo, os ensaios preliminares (executados com o banco de ensaios completo) possibilitaram que se adotassem tais valores de forma coerente.

Primeiramente foi determinado o diâmetro da barra de aço a ser seccionada. Este diâmetro deveria ser o maior possível, permitindo uma análise do comportamento dos discos em operações mais severas.

Desse modo, foi determinado que a barra teria 5/8 pol (15,9 mm) de diâmetro. Acima deste valor o motor “travava”, mesmo com cortes sendo executados com a menor velocidade de mergulho possível de se obter no banco de ensaios.

Em seguida foi verificada a magnitude da força de corte do processo, com o objetivo de se obter uma aquisição de dados precisa, ampla e com sensibilidade adequada.

Como o programa ativa a rotina de aquisição de dados quando o valor da força de corte do processo ultrapassa uma constante numérica pré-definida, fez-se necessária a determinação deste valor mínimo. Este valor não poderia ser muito pequeno, pois resultaria numa aquisição muito sensível, onde a mínima resistência à rotação do motor de acionamento do

disco abrasivo (atrito entre as correias e polias, mancais etc) poderia ativar o programa. Por outro lado, também não poderia ser elevado, pois resultaria na perda de dados (pontos) importantes de força de corte, que ajudariam na interpretação dos resultados. Desse modo, chegou-se nos valores de 6 e 60 N para a força tangencial de corte média mínima e máxima, respectivamente.

Ficou estabelecido, considerando-se os limites da bancada de ensaios e após a realização de diversos ensaios, que o término de cada ensaio se daria quando o disco abrasivo atingisse o diâmetro externo de 230 mm ou quando o disco abrasivo travasse ou quebrasse.

Após diversos ensaios foram determinados três valores para as velocidades de mergulho (cada valor de v_f era mantido constante num mesmo ensaio), sendo estas obtidas com auxílio de um inversor de frequência. Estas velocidades são: $v_{f1} = 2,0$ mm/s (10 Hz), $v_{f2} = 3,4$ mm/s (20 Hz) e $v_{f3} = 4,6$ mm/s (30 Hz).

Também foram selecionadas duas velocidades de corte; uma decrescente com a perda diametral do disco abrasivo $v_{si} = 70$ m/s (inicia com 70 m/s e decresce constantemente) e outra constante $v_s = 70$ m/s. Para manter a velocidade de corte constante, a rotação do motor de acionamento do disco abrasivo era acrescida proporcionalmente à perda diametral do disco abrasivo. Este procedimento é preciso, uma vez que o programa de aquisição de dados interrompe a leitura no fim de cada 10 cortes, “abrindo” uma tela onde o usuário deve inserir o novo diâmetro do disco abrasivo e pode aumentar a rotação do motor de acionamento (através de outro inversor de frequência) até que, simultaneamente, seja corrigida a velocidade de corte no valor desejado.

Definidas todas as condições de usinagem, pôde-se estruturar o sequenciamento aleatório dos ensaios, através de sorteio. Isto foi realizado para evitar a ocorrência de erros sistemáticos e a influência de vícios no registro dos dados obtidos. Isto é de grande importância principalmente na medição do desgaste diametral do disco abrasivo, que está relacionada à correção da velocidade de corte e com o término do ensaio. Na tabela 5.1 são apresentadas a estrutura e sequenciamento dos ensaios.

Tabela 5.1: Estrutura e sequenciamento dos ensaios.

Disco Abrasivo	Tipo de material	Velocidade de corte v_s	Velocidade de mergulho v_f	Sequenciamento dos ensaios
AR302	ABNT 1020	constante	v_{f1}	6
			v_{f2}	1
			v_{f3}	3
		decrecente	v_{f1}	5
			v_{f2}	2
			v_{f3}	4
	ABNT 1045	constante	v_{f1}	10
			v_{f2}	9
			v_{f3}	7
		decrecente	v_{f1}	12
			v_{f2}	11
			v_{f3}	8

5.5 - Cuidados tomados para a minimização de erros

Alguns cuidados foram considerados previamente, visando a diminuição dos erros humanos e do sistema, que pudessem ocorrer.

Estes cuidados foram:

- a velocidade de mergulho do disco abrasivo é controlada automaticamente, evitando-se as possíveis variações, como acontece no avanço manual;
- fixação adequada da barra de aço na morsa através de apoio nivelado, impedindo sua fixação em ângulo o que resultaria numa seção de corte diferente (elipse);
- constância de apenas três pessoas para execução dos ensaios, mantendo sempre a mesma maneira de fixação da peça e medição dos discos abrasivos;
- aquisição das barras de aço e dos discos abrasivos de um mesmo lote, evitando heterogeneidades e diferenças de constituição decorrentes de distintos processos de fabricação.

5.6 - Ciclo dos ensaios

Para a realização segura dos ensaios foi desenvolvida uma lista da sequência operacional do banco de ensaios. O desenvolvimento deste tipo de lista é importante para prevenção de acidentes físicos, já que nestes ensaios o operador da máquina de corte abrasivo, em alguns momentos, fica próximo ao disco abrasivo em funcionamento. Além disso, como o tempo médio de duração de um ensaio é elevado (aproximadamente 6 horas), qualquer erro que interferisse na aquisição de dados poderia resultar na perda total do ensaio, tornando o processo cansativo.

A sequência operacional pode ser verificada na listagem abaixo:

1. Ligam-se todos os equipamentos elétricos que compõem o banco de ensaios: computador, alimentadores dos inversores de frequência e circuito eletrônico;
2. Acessa-se o programa de aquisição de dados (digitando C:\disco [enter]);
3. Digitam-se os dados específicos do ensaio requisitados pelo programa;
4. Fixação do disco abrasivo na máquina de corte, com o cuidado de deixar o lado do anel metálico encostado com o flange de aperto;
5. Prendem-se devidamente a barra de aço na morsa;
6. Acionamento do motor do disco abrasivo (através do inversor de frequência);
7. Manualmente, executa-se suavemente um corte para a uniformização do disco abrasivo (balanceamento), para se evitar o travamento do motor de acionamento, já que o avanço de mergulho do disco abrasivo é automático;
8. Desligam-se o motor de acionamento do disco abrasivo;
9. Medição do diâmetro externo do disco abrasivo. Este procedimento é executado de forma indireta, por meio de um compasso externo, escala e paquímetro (com a haste para medidas internas). O valor obtido da média aritmética das 4 medições (aproximadamente equidistantes) é utilizado para a medição da velocidade de corte;
10. Digitam-se o valor do diâmetro externo do disco abrasivo para o cálculo automático da velocidade de corte;
11. Ligam-se novamente o motor de acionamento do disco abrasivo;

12. Ajustam-se a velocidade de corte desejada, aumentando ou diminuindo a frequência do motor do disco abrasivo (através do inversor de frequência) e verificando o valor de v_s simultaneamente no monitor do computador;
13. Leitura da força tangencial de corte em vazio;
14. Regulam-se a velocidade de mergulho do disco abrasivo específica do ensaio, através do inversor de frequência do motor de avanço. Faz-se necessário salientar que, neste procedimento, o motor em questão não está em funcionamento, sendo acionado somente no momento do corte, pelo operador, através da chave inversora (que provoca o avanço e o recuo do disco abrasivo);
15. Reposicionamento da barra de aço a ser seccionada;
16. Ativam-se a aquisição de dados do “software”;
17. O operador do computador sinaliza para o operador da máquina que o corte pode ser realizado;
18. Terminado o corte, o operador da máquina inverte o sentido do avanço até que o disco abrasivo retorne à posição inicial;
19. Repetem-se os procedimentos de ensaio do número 15 ao 18, até que sejam realizados 10 cortes;
20. Depois do décimo corte, desliga-se o motor de acionamento do disco abrasivo;
21. Medem-se novamente o diâmetro externo médio do disco abrasivo, sem retirá-lo da máquina de corte;
22. Repetem-se os procedimentos de ensaio do número 9 ao 13;
23. O ensaio recomeça, então, do procedimento de número 15 em diante, até que o disco abrasivo atinja o diâmetro final estipulado;

Observação: para os ensaios realizados com o valor da velocidade de corte decrescente (ensaio 1, 3, 6, 7, 9 e 10, segundo tabela 5.1) não deve ser executado o procedimento de número 12.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados para o estudo do comportamento de discos abrasivos submetidos a diversas condições de corte e para a avaliação do desgaste da superfície de corte dos discos abrasivos, em função da geometria teórica do cavaco arrancado de materiais dúcteis e frágeis.

6.1 - Análise da geometria dos cavacos arrancados na operação de corte com discos abrasivos

Segundo Malkin (1992), a distribuição das arestas cortantes na superfície de corte das ferramentas abrasivas é aleatória, e as profundidades de atuação dos grãos abrasivos são diferentes. Os grãos abrasivos agem simultaneamente e em grande número.

Nas operações de corte com discos abrasivos, do tipo mergulho basculante, os cavacos são arrancados de forma mais severa se comparado a outros processos de usinagem, como por exemplo, o processo de retificação.

Os cavacos arrancados por este tipo de operação possuem geometrias que são diretamente relacionadas aos parâmetros de velocidade de corte e velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça. A dureza e a geometria da peça a ser cortada também influenciam na forma geométrica dos cavacos arrancados.

Para a constatação das variações que ocorrem na geometria dos cavacos, estes foram fotografados através de um foto-microscópio Carl Zeiss, modelo 58419, com lente objetiva Plan 2,5/0,08; 160/-, optovar regulado em 1,25 com ampliação de 3,2 vezes com dispositivo automático de exposição regulado na intensidade IX e com sensibilidade 0,4.

A avaliação da geometria dos cavacos é uma atividade de grande dificuldade, considerando que as amostras apresentam cavacos de comprimentos diversos, pelas variações do comprimento de contato.

6.1.1 - Geometria dos cavacos arrancados no corte do aço ABNT 1020, em função da velocidade de mergulho e da velocidade de corte

Os cavacos arrancados no corte de aços dúcteis, são mais longos, espessos e variam dimensionalmente com as condições de corte. Neste item estas variações são apresentadas e discutidas, visando o melhor entendimento da fenomenologia de corte do processo em questão.

6.1.1.1 - Cavacos do aço ABNT 1020, com v_f variável e v_s constante

Quando a velocidade de corte é constante, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem somente pela elevação da velocidade de mergulho, durante os sucessivos cortes (equações 3.1 e 3.7). Consequentemente, à medida em que v_f cresce, há o aumento progressivo da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados (equação 3.8) e da densidade de grãos abrasivos ativos pelo aumento do ângulo de penetração dos grãos abrasivos. Os cavacos arrancados são mais fragmentados pois o número de cavacos arrancados por unidade de tempo é mantido constante, pela manutenção de v_s constante (equação 3.5). Isto acontece pelo fato de que no início dos cortes, com disco abrasivo no seu diâmetro externo máximo, o número de grãos ativos é maior e a rotação do disco abrasivo é menor. Com a perda diametral do disco abrasivo, a rotação é aumentada, mantendo constante o número de cavacos arrancados.

Isto pode ser verificado nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3 onde são apresentadas as geometrias dos cavacos obtidos nos ensaios com velocidade de mergulho variável e velocidade de corte constante.

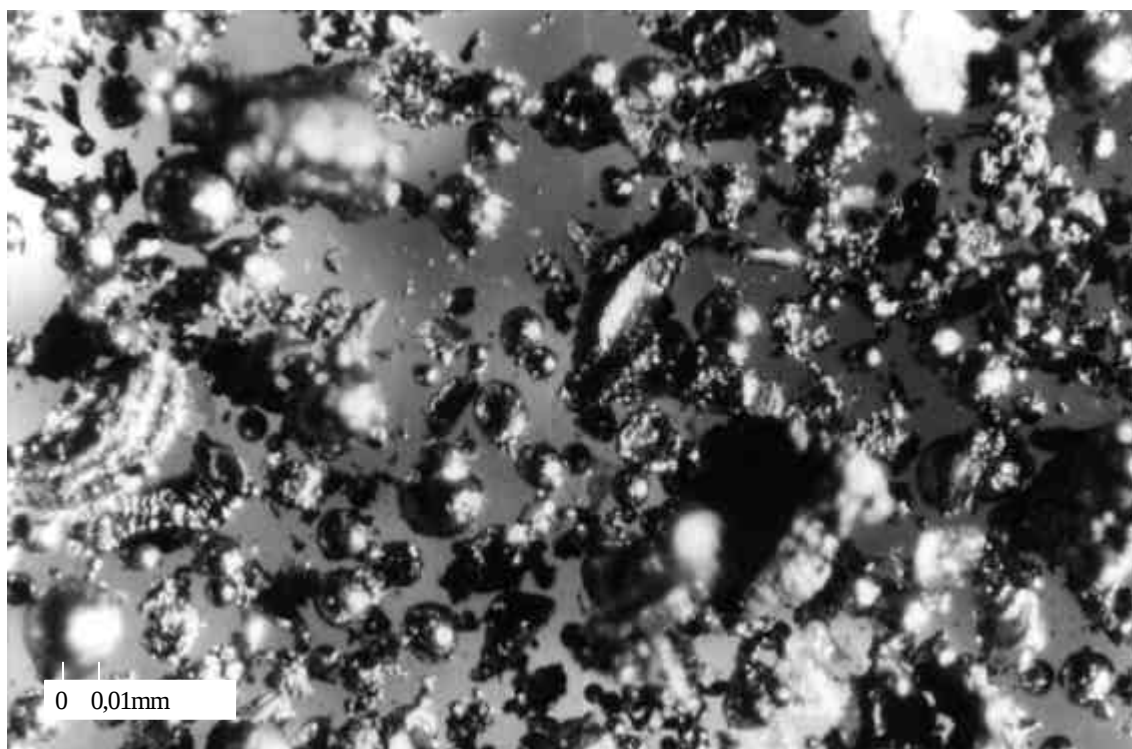


Figura 6.1: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

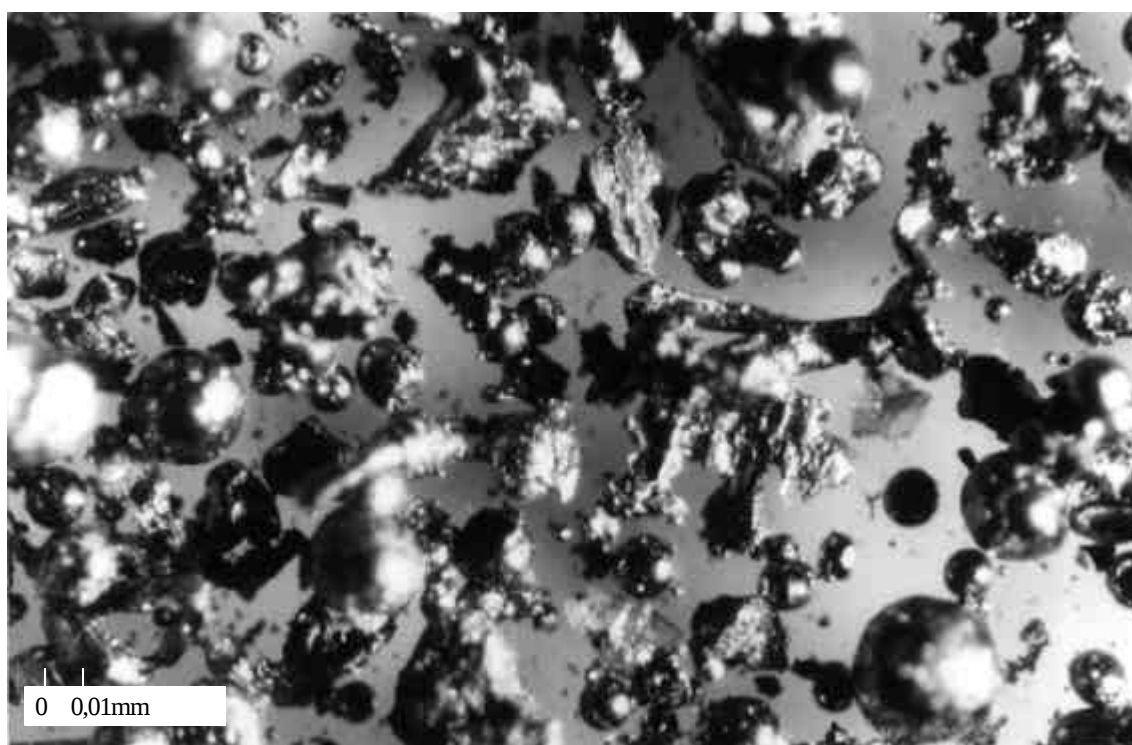


Figura 6.2: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

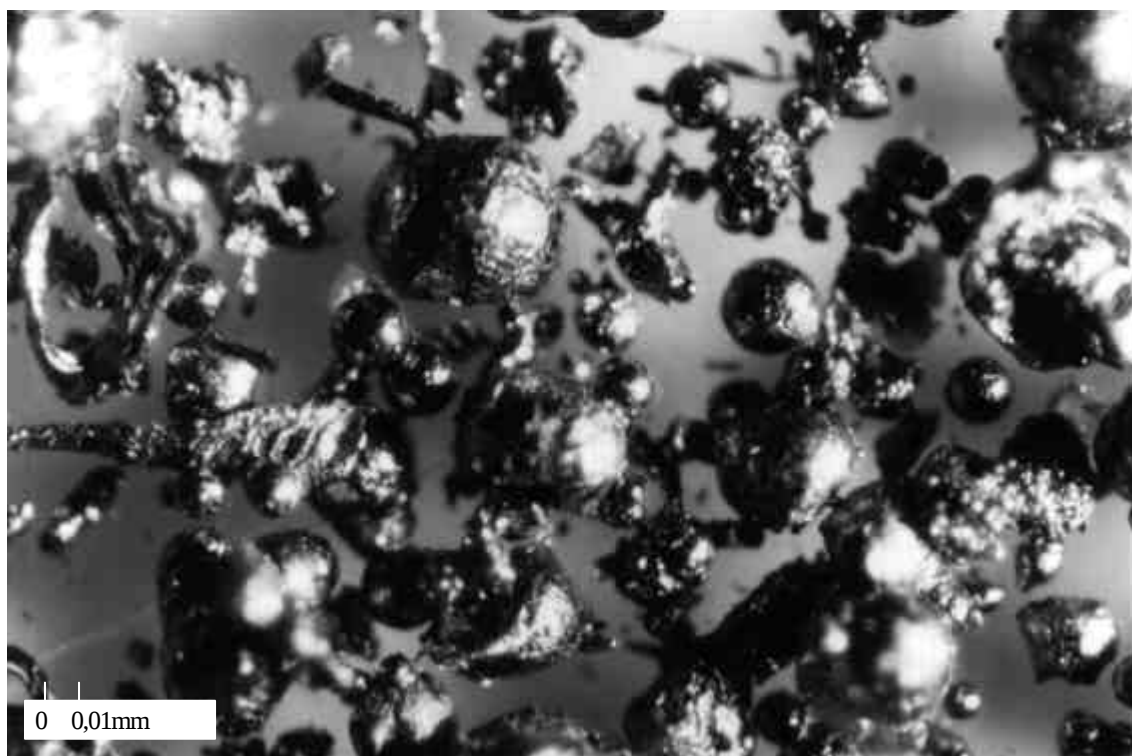


Figura 6.3: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

Pode-se notar que entre os cavacos há grãos abrasivos fraturados (e/ou arrancados) e pequenas esferas ocas de aço. Isto ocorre pelos impactos dos grãos abrasivos sobre a peça e pela ausência de refrigeração, onde as elevadas temperaturas na região de corte fundem parte dos cavacos arrancados, formando as esferas ocas de aço, além de deteriorar o ligante, diminuindo a fixação dos grãos abrasivos.

6.1.1.2 - Cavacos do aço ABNT 1020, com v_f variável e v_s decrescente

No caso da velocidade de corte decrescente, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem de forma mais acentuada, com relação ao caso anterior, pela combinação da elevação da velocidade de mergulho e diminuição da velocidade de corte. Neste caso a densidade de grãos abrasivos aumenta rapidamente e progressivamente, sendo maior que o caso anterior. Como consequência, os cavacos possuem maior espessura e são mais alongados pela ductilidade deste aço. O número de cavacos arrancados é menor, pela diminuição da velocidade de corte.

Nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6 são apresentadas as geometrias de cavacos obtidas nos ensaios com velocidade de mergulho e velocidade de corte variáveis.

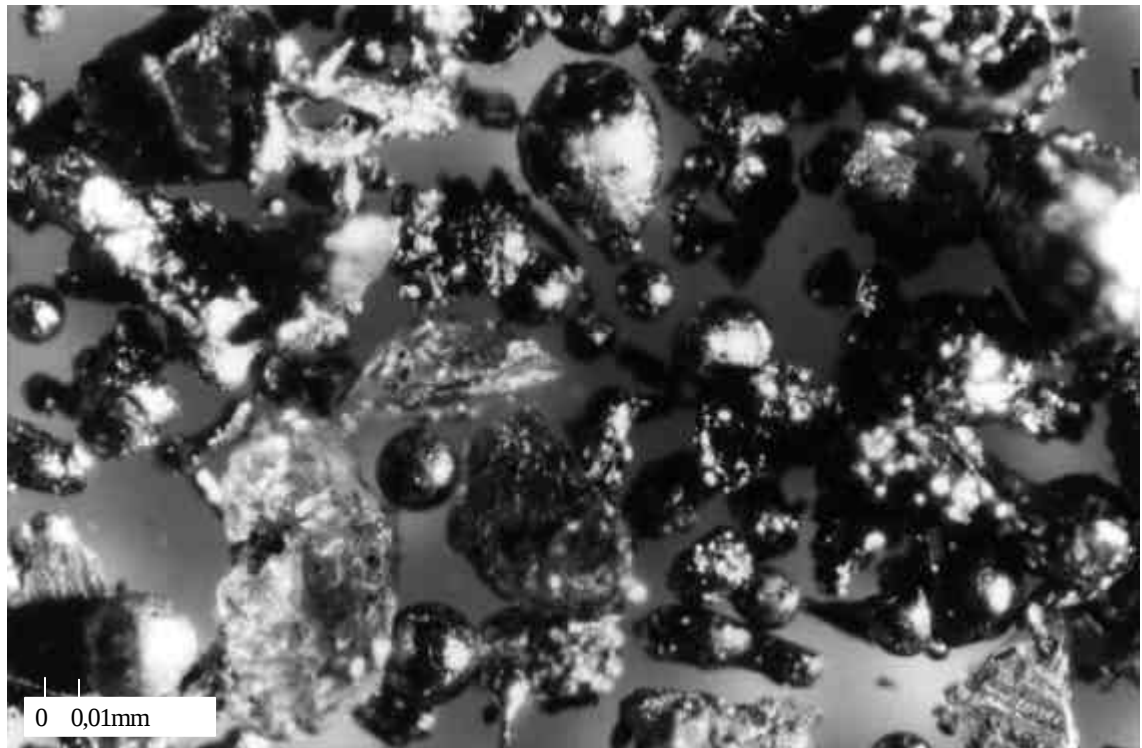


Figura 6.4: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

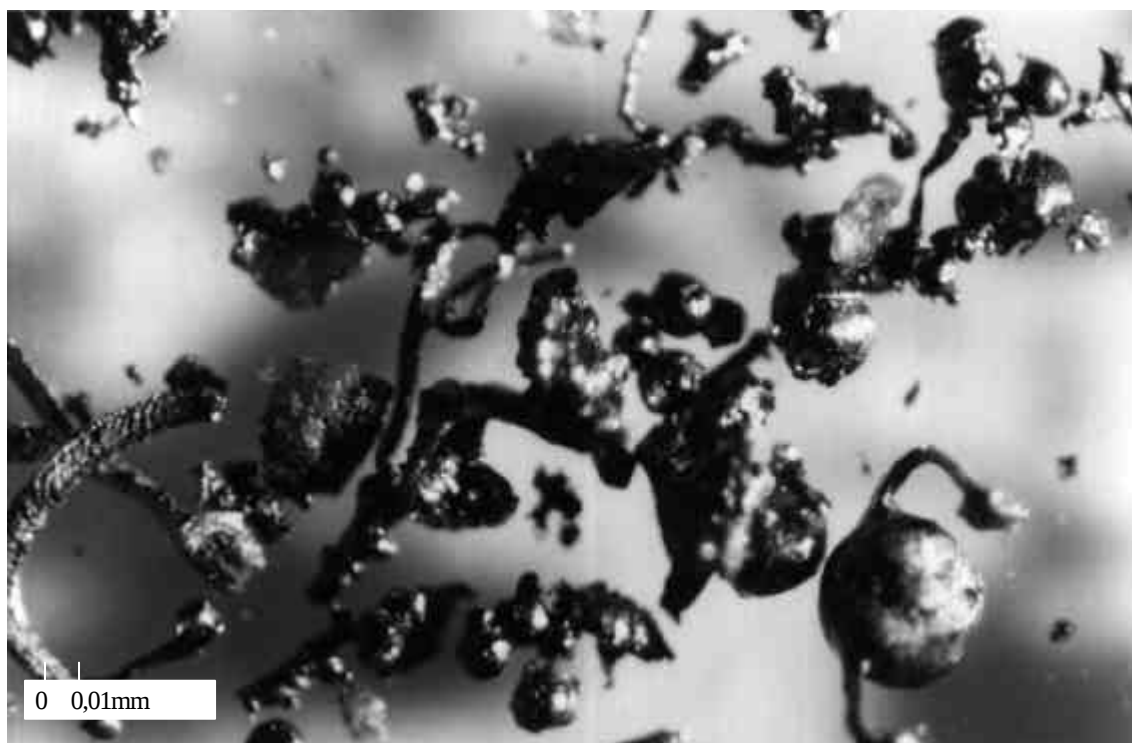


Figura 6.5: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

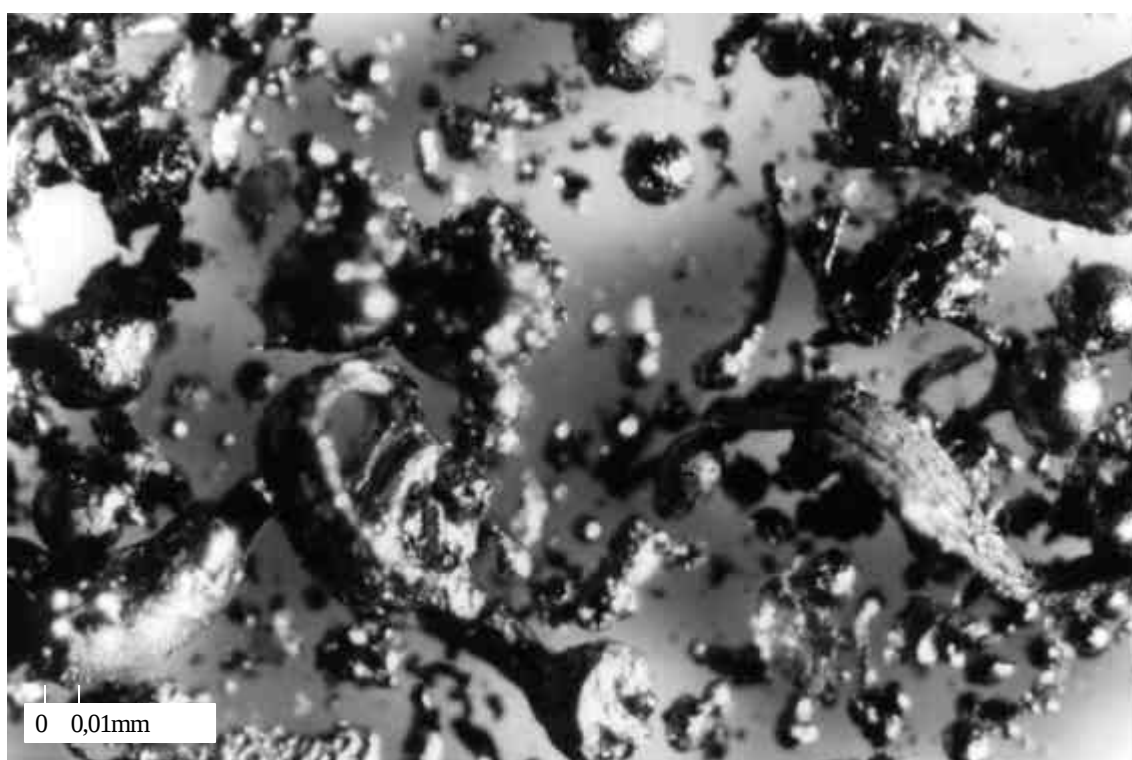


Figura 6.6: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

6.1.2 - Geometria dos cavacos arrancados no corte do aço ABNT 1045, em função da velocidade de mergulho e da velocidade de corte

Neste item são apresentadas e discutidas as geometrias dos cavacos obtidos no corte de aços frágeis com discos abrasivos.

6.1.2.1 - Cavacos do aço ABNT 1045, com v_f variável e v_s constante

De forma similar ao que já foi apresentado, os mecanismos de geração de cavaco são os mesmos, porém, como nestes casos foi utilizado um aço frágil, os cavacos arrancados são mais finos e quebradiços.

As geometrias dos cavacos obtidas, com velocidade de mergulho variável e velocidade de corte constante, são apresentadas nas figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

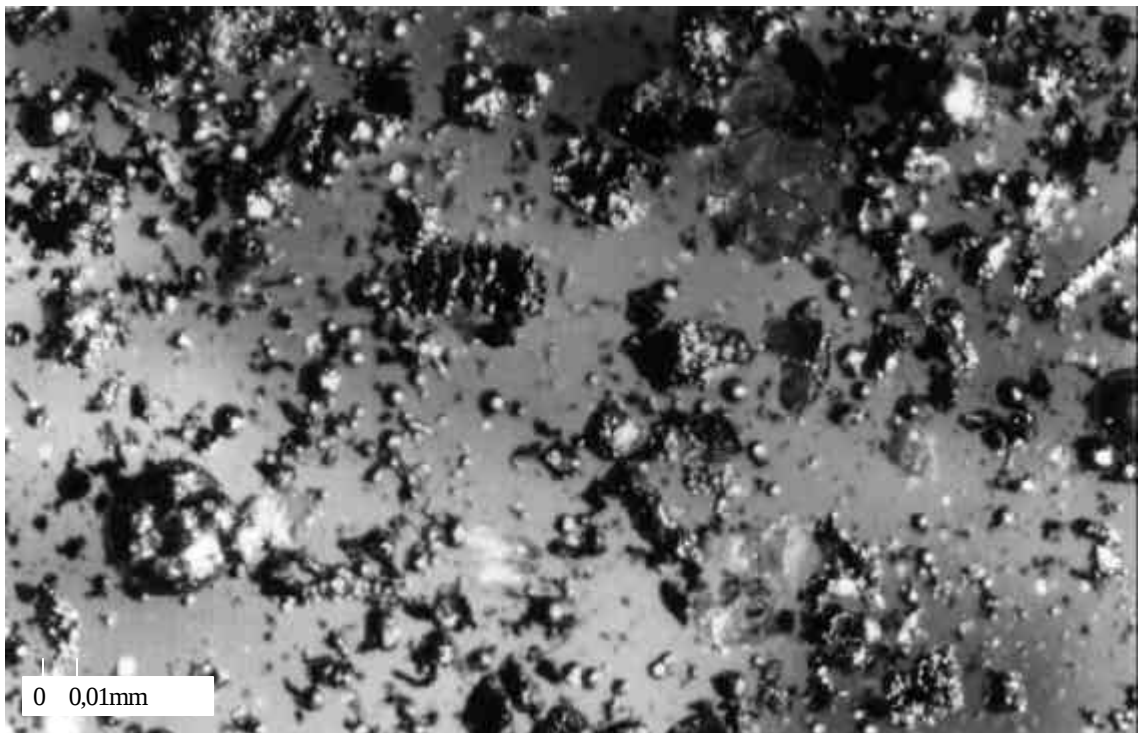


Figura 6.7: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

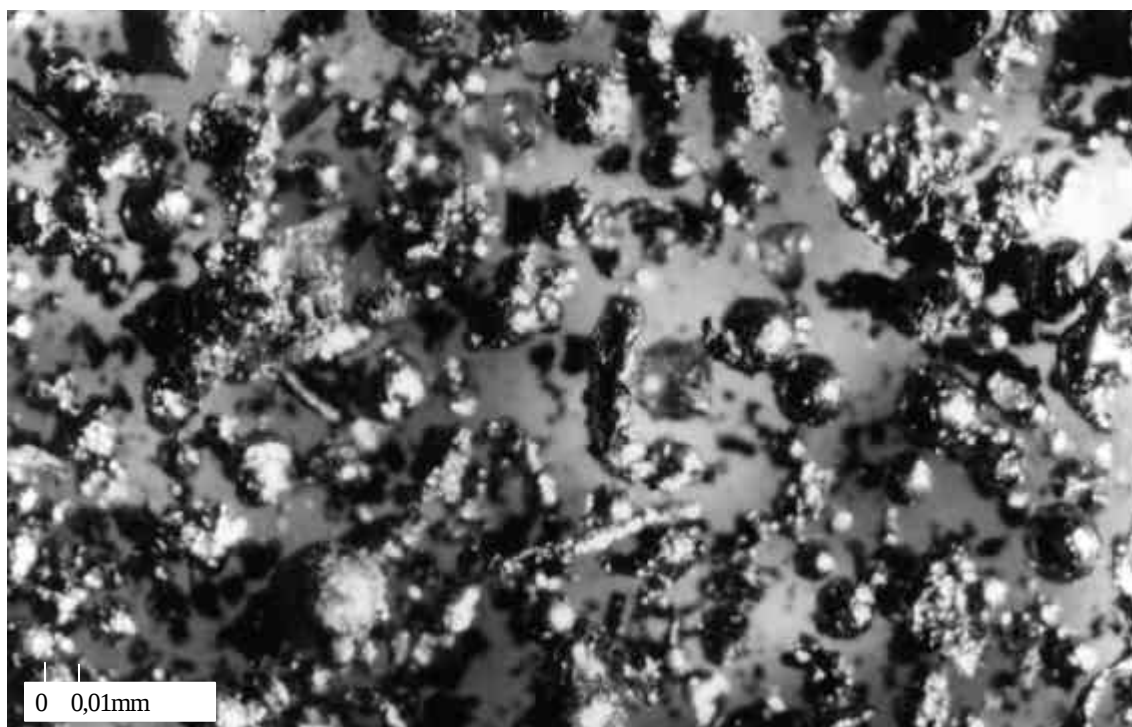


Figura 6.8: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

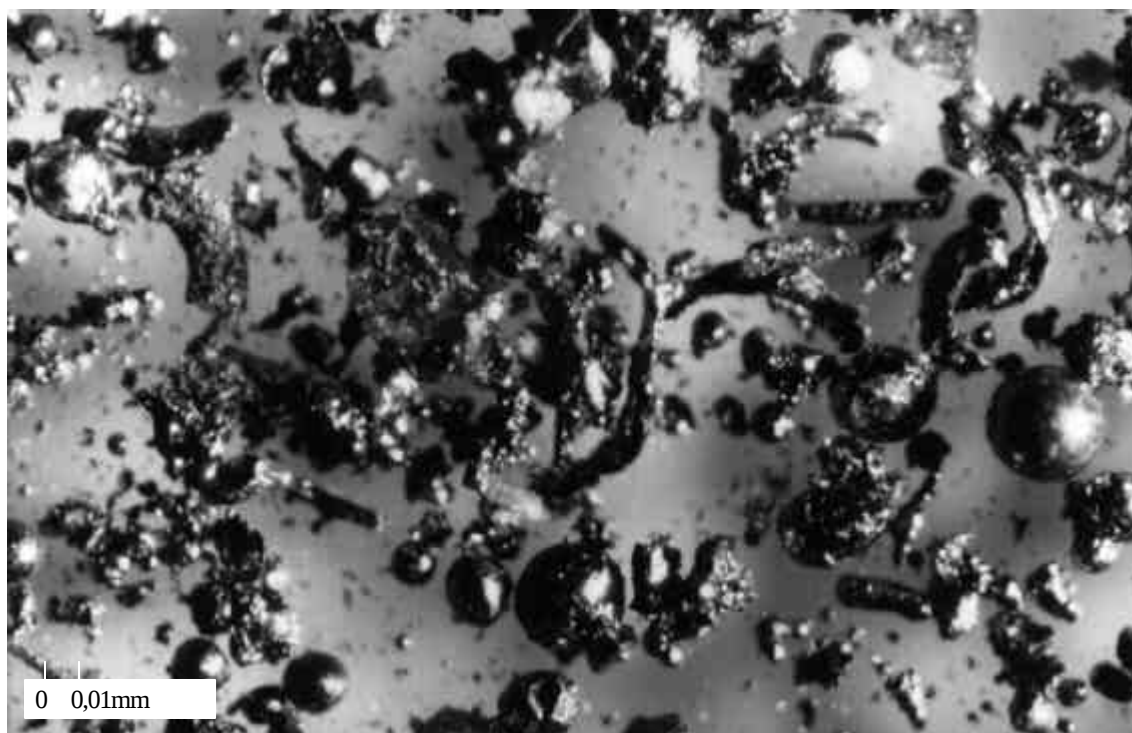


Figura 6.9: Geometria dos cavacos obtidas no ensaio com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_s = 70,0$ m/s.

Pode-se confirmar que estes cavacos arrancados são mais finos e quebradiços do que os cavacos apresentados nas figuras 6.1, 6.2 e 6.3.

6.1.2.2 - Cavacos do aço ABNT 1045, com v_f variável e v_{si} crescente

Nestes ensaios ficou evidenciada a maior espessura do cavaco arrancado, pelas variações das velocidade de mergulho e de corte.

Os cavacos obtidos nestes casos, são apresentadas nas figuras 6.10, 6.11 e 6.12.

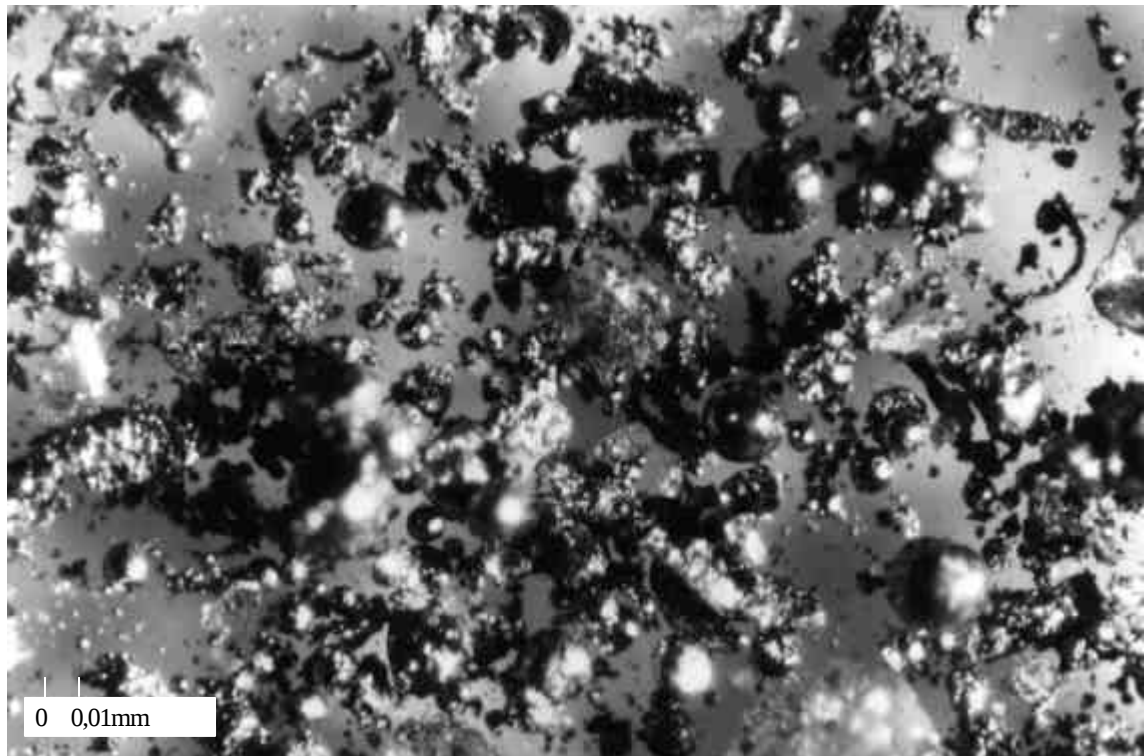


Figura 6.10: Geometria dos cavacos obtidas no ens. com $v_f = 2,0$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

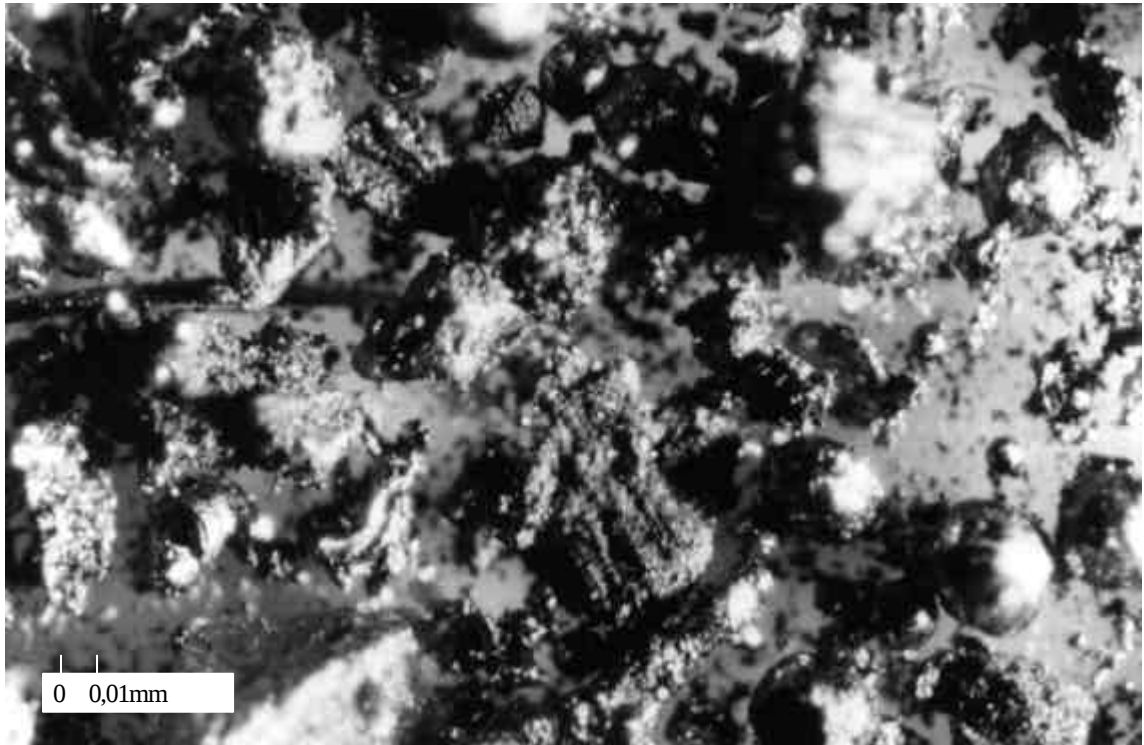


Figura 6.11: Geometria dos cavacos obtidas no ens. com $v_f = 3,4$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

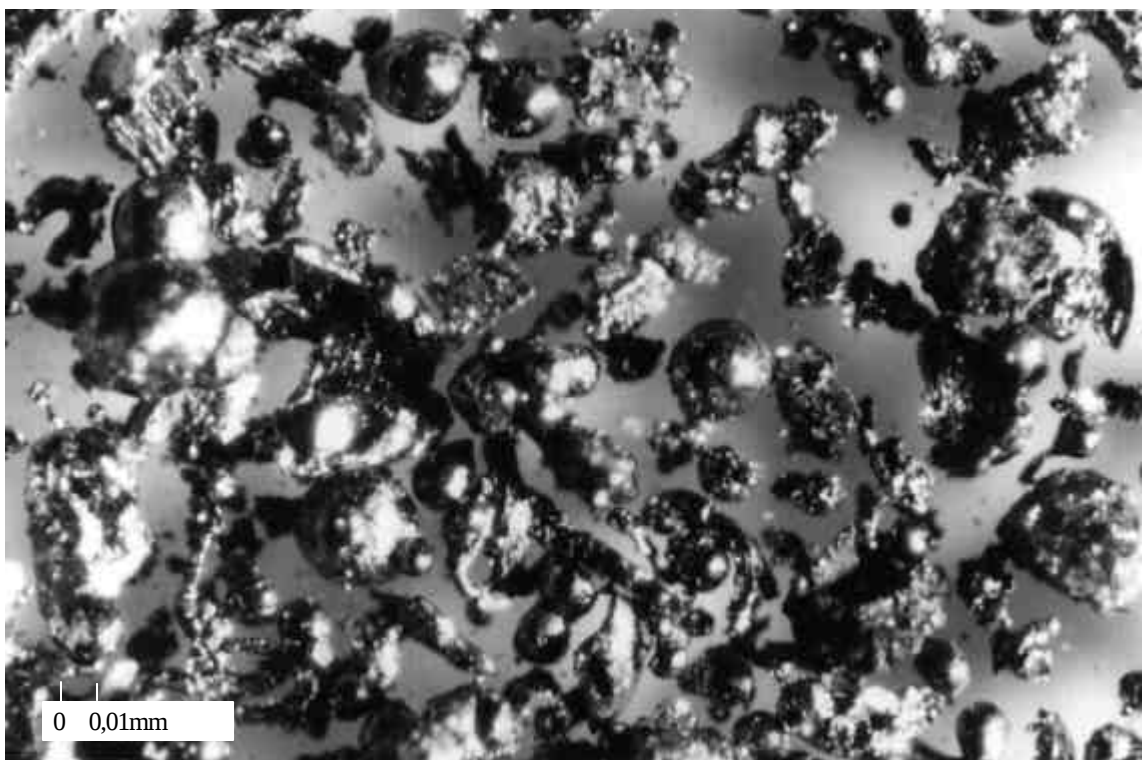


Figura 6.12: Geometria dos cavacos obtidas no ens. com $v_f = 4,6$ mm/s e $v_{si} = 70,0$ m/s.

Uma comparação também pode ser feita destas amostras de cavaco com os das figuras 6.4, 6.5 e 6.6. Assim verifica-se que os cavacos obtidos pelo corte do material frágil foram mais finos e quebradiços.

6.1.3 - Considerações gerais sobre as geometrias dos cavacos arrancados

O macro desgaste da superfície de corte dos discos abrasivos está diretamente relacionado à geometria dos cavacos arrancados e à ação da temperatura na região de contato.

Analizando-se somente o efeito da geometria do cavaco no desgaste da superfície de corte do disco abrasivo, pode-se afirmar que as geometrias mais volumosas dos cavacos arrancados, que apresentam maiores dificuldades para serem alojados nos poros dos discos abrasivos, tendem a desgastar mais o ligante.

O outro fator que influencia o macro desgaste é a temperatura na região de contato grão-peça, que normalmente é elevada (Rowe et al., 1995; Ueda, et al., 1995; Ueda, et al., 1993) tornando-se ainda maior quando o corte não é refrigerado. Altas temperaturas deterioram o ligante enfraquecendo a fixação dos grãos abrasivos (Brinksmeier & Minke, 1993). Isto facilita a liberação destes caracterizando o macro desgaste.

O micro desgaste do grão abrasivo somente pode ocorrer se o ligante mantiver sua capacidade de retenção. Assim, análise do macro desgaste é de fundamental importância para a redução do desgaste diametral do disco abrasivo.

6.2 - Resultados obtidos de força tangencial de corte média em função do volume de material removido

Os resultados de força tangencial de corte média dos ensaios são apresentados em figuras que agrupam 3 ensaios cada. Estes são mostrados na forma de curvas de força tangencial de corte média em função do número de cortes. Nas legendas utilizou-se (além de v_s para os valores de velocidade de corte constante e v_{s1} para velocidade de corte decrescente) t_c para o tempo de corte, que corresponde ao tempo total para a realização de todos os cortes.

6.2.1 - Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente no aço ABNT 1020

As figuras 6.13 e 6.14 mostram os resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente para o aço ABNT 1020, para as três condições de velocidade de mergulho ensaiadas.

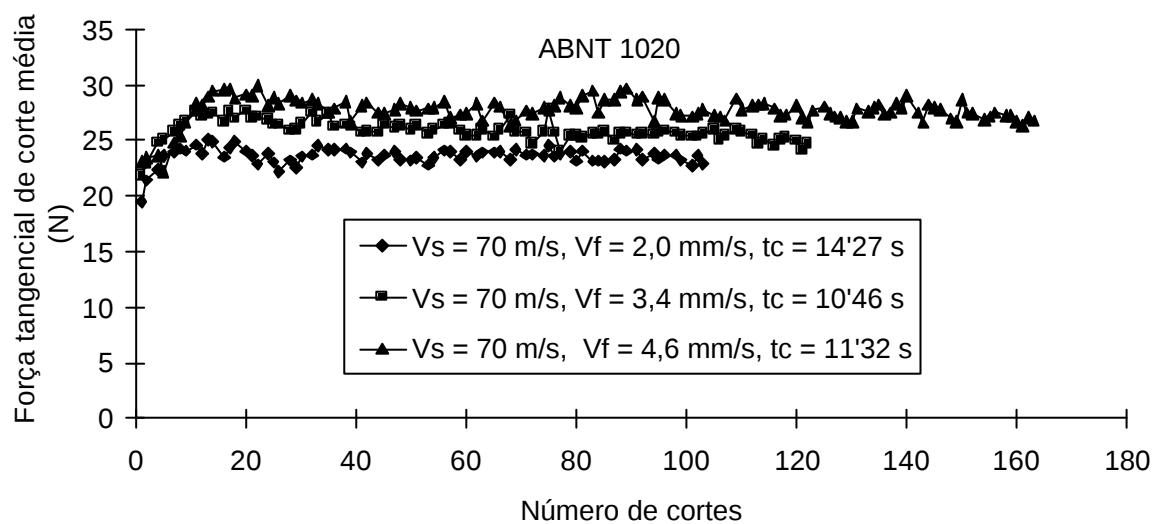


Figura 6.13: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante.

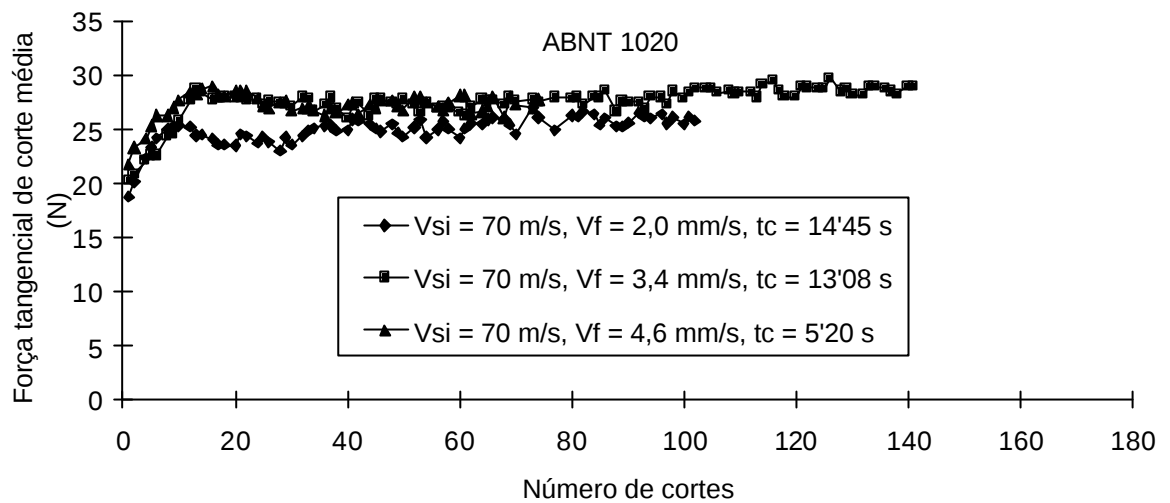


Figura 6.14: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte decrescente.

De modo geral as curvas mostram uma tendência de crescimento da força tangencial de corte média até um patamar e posteriormente sofreram um pequeno decréscimo. Este patamar ocorre pelo fato de que, na etapa de prensagem da fabricação do disco abrasivo, a camada externa é mais dura. Durante o corte esta camada é removida e o disco abrasivo passa a ter a dureza especificada pelo fabricante.

A perda diametral do disco abrasivo provoca a diminuição do número de grãos na sua superfície de corte, e conseqüentemente, os cavacos arrancados têm suas espessuras teóricas máximas progressivamente aumentadas, independentemente da velocidade de corte. Nos ensaios realizados pode-se verificar que a força tangencial de corte média aumenta com a elevação da velocidade de mergulho. Isto ocorre pelo aumento da espessura máxima dos cavacos arrancados.

Nos ensaios com velocidade de corte constante (figura 6.13), a tendência de aumento da espessura dos cavacos arrancados, pela perda diametral do disco abrasivo, é compensada pela manutenção do número de cavacos arrancados por unidade de tempo, que é mantido constante. Assim, cada vez menos grãos abrasivos removem material com espessura crescente.

Devido à tendência de crescimento da espessura dos cavacos arrancados, a força tangencial de corte média deveria aumentar. Entretanto, constatou-se que as curvas de F_{tcm} x N_c (número de cortes) possuem uma tendência decrescente.

Isto ocorre pelo fato de que a rotação do disco abrasivo é constantemente elevada, para compensar a perda diametral do disco abrasivo. Assim, a frequência dos impactos dos grãos abrasivos na peça aumenta, gerando mais calor; conseqüentemente, a temperatura na região de corte é maior. Desta forma, o ligante fica sujeito à fadiga térmica (variações sucessivas de temperatura) que deteriora sua ligação com o grão, facilitando sua liberação. Assim o mecanismo de auto-afiação ocorre com maior intensidade fazendo com que a F_{tcm} seja progressivamente decrescente.

Nos ensaios com velocidade de corte decrescente (figura 6.14), o ângulo de penetração aumenta proporcionalmente à diminuição de v_s e elevação de v_f . Assim, os cavacos são arrancados com espessuras máximas maiores do que no caso anterior. O número de cavacos arrancados é progressivamente menor, pela diminuição da velocidade de corte. Assim, cada vez menos grãos abrasivos removem material com maior espessura do cavaco.

6.2.2 - Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente no aço ABNT 1045

As figuras 6.15 e 6.16 mostram os resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante e decrescente para o aço ABNT 1045, para as três condições de velocidade de mergulho ensaiadas.

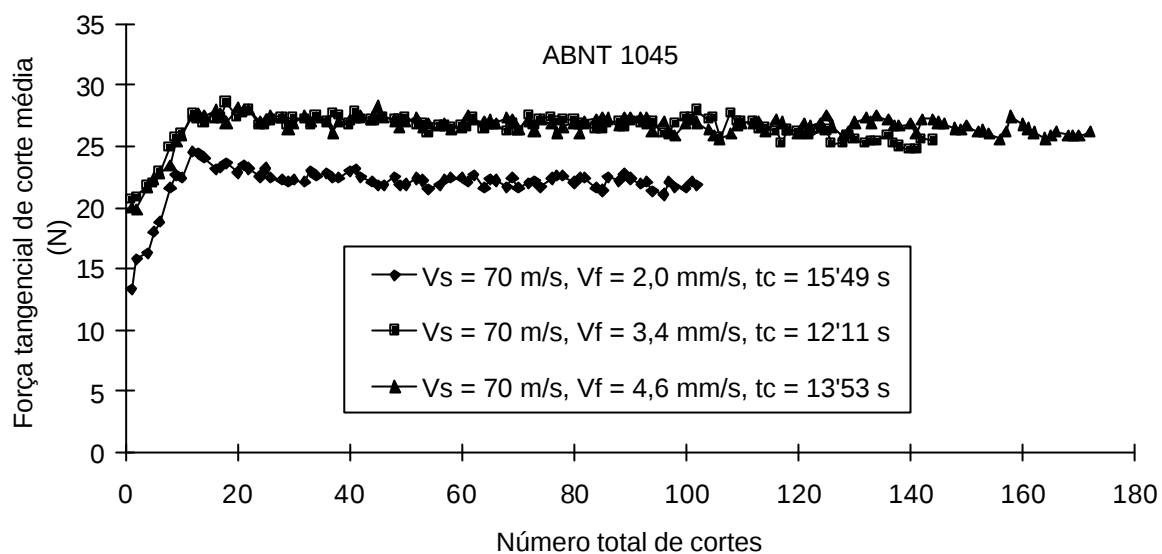


Figura 6.15: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte constante.

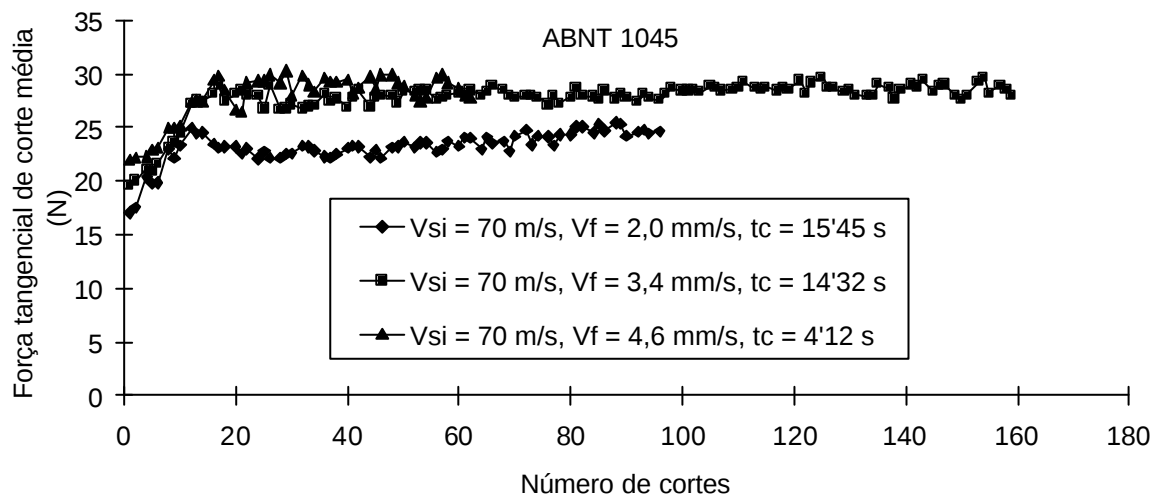


Figura 6.16: Resultados de força tangencial de corte média, obtidos com velocidade de corte decrescente.

Os valores de força tangencial de corte média, obtidos durante os ensaios, apresentaram a mesma tendência dos realizados com o aço ABNT 1020; ou seja, as curvas tenderam a decrescer, quando foi utilizada a velocidade de corte constante, e permaneceram num pa-

tamar elevado e com tendência de crescimento, quando a velocidade de corte foi decrescente.

Os valores de força tangencial de corte média foram menores nos ensaios com o aço frágil. Isto ocorre pelo fato de que os cavacos arrancados com este material são mais finos e quebradiços.

Observa-se também que o volume de material removido foi maior e o empastamento da superfície de corte dos discos abrasivos, verificado por análise visual, foi menor.

6.3 - Influência da velocidade de mergulho no número e no tempo de corte.

A velocidade de mergulho do disco abrasivo v_f sobre a peça influencia no número de cortes, na geometria do cavaco arrancado e no tempo de corte.

Se v_f for pequena, os cavacos arrancados apresentam pequena espessura; porém, o tempo de contato (entre o disco abrasivo e a peça) é maior. Isto faz com que haja uma maior migração de calor para o ligante.

Pela ação da temperatura, há a deterioração do ligante que desprende mais facilmente os grãos abrasivos, o que provoca a diminuição do número de cortes.

Aumentando-se a velocidade de mergulho, o tempo de contato é menor e os cavacos são mais espessos. A ação da temperatura sobre o ligante ocorre em intervalos de tempo menores. A força tangencial de corte por grão abrasivo é maior, dificultando o desprendimento dos grão da superfície de corte do disco abrasivo.

6.3.1 - Resultados com o aço ABNT 1020

Nas figuras 6.17 e 6.18 são apresentados os resultados do número de corte realizados pelo disco abrasivo e do tempo de corte, em função da velocidade de mergulho, para o aço ABNT 1020.

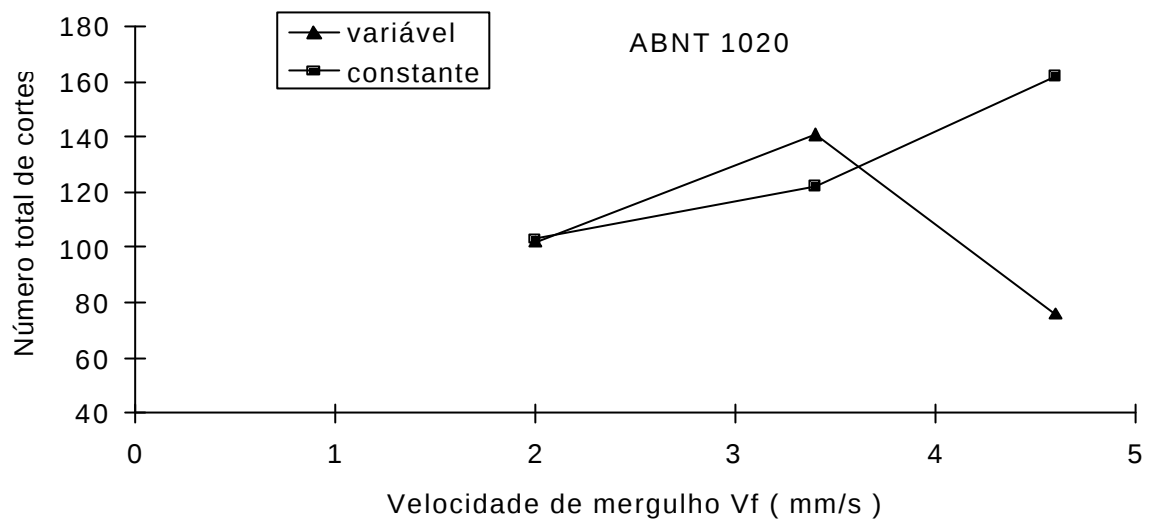


Figura 6.17: Resultados da influência da velocidade de mergulho no número de cortes para o aço ABNT 1020.

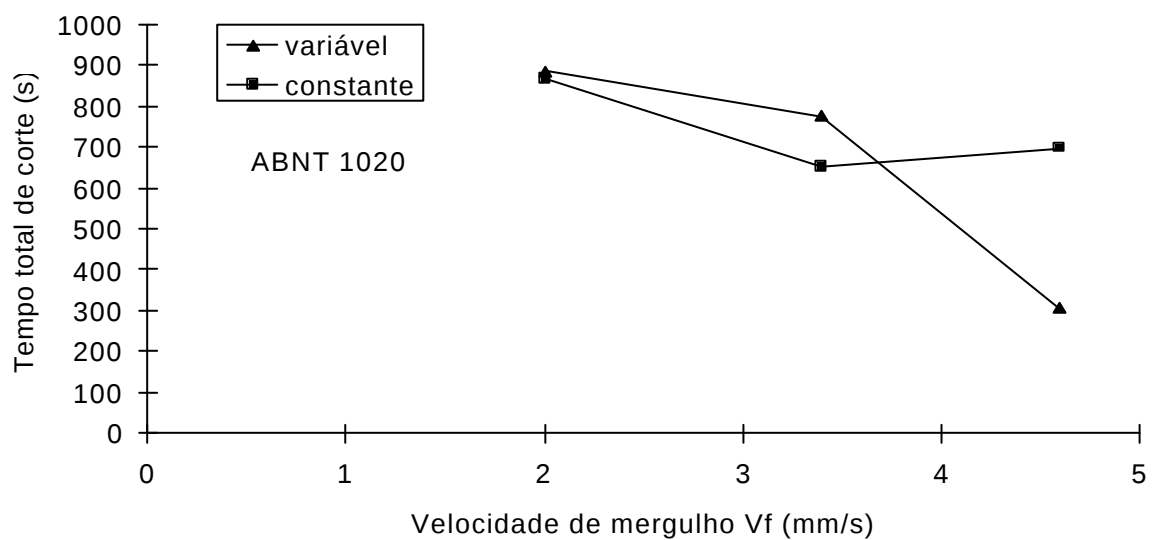


Figura 6.18: Resultados da influência da velocidade de mergulho no tempo de corte para o aço ABNT 1020.

Da análise conjunta das figuras, pode-se observar que quando $v_f = 2,0$ mm/s o tempo de corte foi maior e o volume de material removido menor, para as duas condições de v_s . Isto ocorre pelo fato de que o tempo para a realização de cada corte é maior do que nos outros casos de v_f . Portanto, o tempo total de corte foi maior pela lentidão dos cortes, e não pelo volume de material removido. Consequentemente, o número de cortes foi menor. Neste caso, o desgaste do disco abrasivo ocorreu rapidamente pela ação prolongada da temperatura. Segundo informações obtidas na empresa NORTON, a ação prolongada da temperatura acima de 600 °C degrada o ligante resinóide.

Quando foi utilizada $v_f = 3,4$ mm/s o número de cortes foi aumentado e o tempo de corte reduzido para ambos os casos. Isto ocorreu mesmo com o aumento da espessura dos cavacos, que deveriam desgastar o ligante. Este fato pode ser explicado da seguinte forma: com o aumento da v_f , o tempo para a realização de cada corte é menor, expondo o ligante à ação da temperatura por um tempo menor. Assim, o desgaste da superfície de corte do disco abrasivo diminui, possibilitando a realização de um número maior de cortes. Portanto, o tempo total de corte foi menor.

Ainda com relação a $v_f = 3,4$ mm/s, nota-se que o número de cortes e o tempo total de corte foram maiores para v_{si} . Este comportamento ocorreu pela manutenção da frequência de impactos entre os grãos e a peça. Assim, a temperatura na região de corte é menor, desgastando menos o disco abrasivo que permanece removendo material por mais tempo.

Nos ensaios com $v_f = 4,6$ mm/s, houve travamentos alternados na condição de v_{si} , porém o ensaio continuou por não haver a quebra do disco abrasivo. A interrupção do ensaio ocorreu devido a sucessivos travamentos. Estes travamentos ocorreram pela elevação da espessura do cavaco e pela potência limitada do motor para esta condição de corte.

Para v_s o número e o tempo total dos cortes aumentaram. Estes aumentos ocorreram pela diminuição do tempo de cada corte que deteriorou menos o ligante. Desta forma, seu desgaste diametral foi menor, possibilitando um maior número de cortes. Portanto, o tempo total de corte foi maior.

Neste caso, o ângulo de penetração do grão da peça foi menor, gerando cavacos com menor espessura. Assim, o esforço para remover o cavaco foi menor evitando que o motor fosse solicitado no seu limite de potência.

Em todos os ensaios com v_s , a dureza dinâmica é maior, porém não foi significativamente suficiente para reter os grãos na superfície de corte do disco abrasivo, que desprenderam-se pela ação da temperatura.

6.3.2 - Resultados com o aço ABNT 1045

Nas figuras 6.19 e 6.20 são apresentados os resultados do número de cortes realizados pelo disco abrasivo e do tempo de corte em função da velocidade de mergulho para o aço ABNT 1045.

Pode-se verificar que o comportamento das curvas de número de cortes e tempo total de cortes foi semelhante aos obtidos no aço ABNT 1020. Porém, os valores foram maiores pela geometria dos cavacos arrancados com menor espessura e mais fragmentados, promovendo a menor ação do macro desgaste.

Novamente ocorre o travamento do disco abrasivo na condição de $v_f = 4,6$ mm/s e v_{si} . Neste caso, o número de cortes foi significativamente menor pelo fato de que este travamento acarretou numa pequena quebra do disco abrasivo, que impediu o prosseguimento do ensaio.

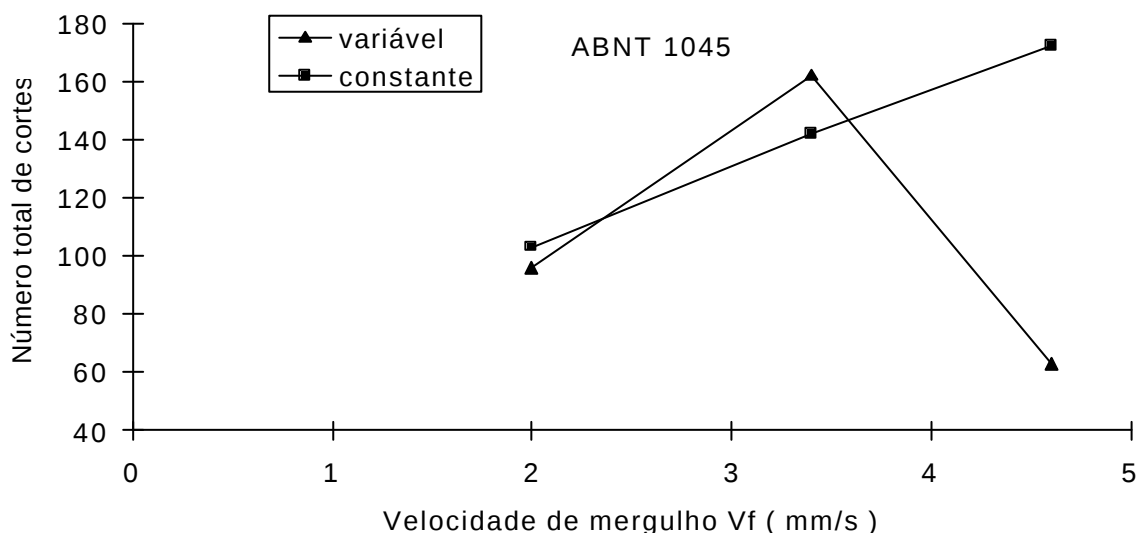


Figura 6.19: Resultados da influência da velocidade de mergulho no número de cortes para o aço ABNT 1045.

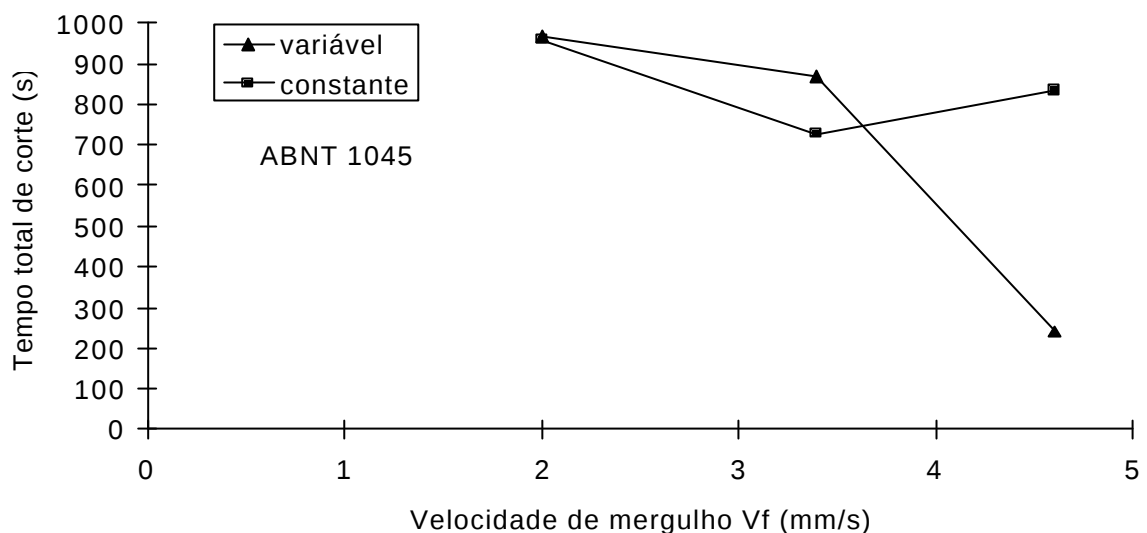


Figura 6.20: Resultados da influência da velocidade de mergulho no tempo de corte para o aço ABNT 1045.

6.3.3 - Considerações gerais sobre a influência da velocidade de mergulho

De forma geral, pode-se afirmar que a velocidade de mergulho influencia a espessura do cavaco arrancado, o número de cortes e consequentemente o tempo total de corte. O fato dos cortes serem realizados mais lentamente eleva o tempo de corte, fazendo com que o ligante fique submetido a elevadas temperaturas por mais tempo, provocando a deterioração da ligação entre o ligante e o grão abrasivo. O ligante perde uma parte da sua capacidade de retenção sobre os grãos abrasivos, que desprendem-se com maior facilidade da superfície de corte do disco abrasivo. Desta forma, a perda diametral é agravada, provocando a antecipação do término do ensaio.

A geometria dos cavacos arrancados também é influenciada pelo tipo de material cortado. A associação do tipo de material, velocidade de corte e velocidade de mergulho pode prolongar a vida do disco abrasivo ou travá-lo.

6.4 - Influência da velocidade de mergulho na relação entre o volume de disco abrasivo gasto/tempo de corte (V_s/t_c)

O volume de disco abrasivo gasto durante os ensaios é praticamente o mesmo para todos, pela imposição do término de ensaio que corresponde ao diâmetro externo final em torno de 230 mm. A exceção ocorreu nos ensaios onde o disco abrasivo travou, pela elevação da força tangencial de corte média.

Para possibilitar a análise do desgaste volumétrico dos discos abrasivos optou-se por utilizar a taxa de desgaste volumétrico deste, que é quantificada pelo volume de disco abrasivo gasto por unidade de tempo, denominada por taxa de desgaste volumétrico do disco abrasivo, V_s/t_c [mm³/s]. Isto é proposto pelo fato de que o tempo de corte para cada ensaio foi diferente.

6.4.1 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo, no aço ABNT 1020

Para uma análise comparativa e quantitativa mais abrangente do comportamento global dos discos abrasivos, são apresentados os valores obtidos para a taxa de desgaste volumétrico do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho.

Na figura 6.21 são apresentados os resultados obtidos de taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho.

Os resultados apresentados mostram que a taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo também tendeu a aumentar com a elevação da velocidade de mergulho. Isto ocorreu pelo fato dos cortes serem feitos mais rapidamente, desgastando menos a superfície de corte do disco pela ação da temperatura com menores intervalos de tempo por corte. Portanto, foram obtidos maiores valores para o tempo de corte total.

No ensaio com velocidade de corte decrescente e velocidade de mergulho elevada, a taxa de desgaste volumétrico também aumentou, mesmo com o travamento do disco abrasivo.

Para os ensaios feitos com velocidade de corte constante, os valores de taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo foram maiores pela ação danosa da temperatura no ligante.

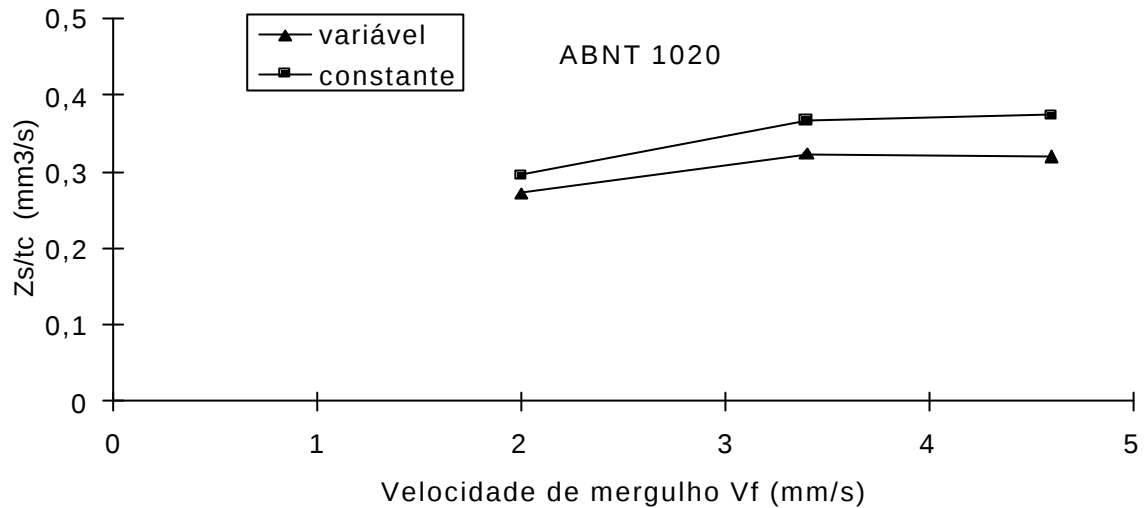


Figura 6.21: Resultados obtidos de taxa de desgaste volumétrico do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1020.

6.4.2 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo, no aço ABNT 1045

Os resultados obtidos de taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho são apresentados na figura 6.22.

De modo similar aos resultados obtidos com o aço ABNT 1020, a taxa de desgaste volumétrico dos discos abrasivos também tendeu a aumentar com a velocidade de mergulho. Porém, os valores obtidos foram menores do que no aço ABNT 1020, pelo maior tempo de corte total.

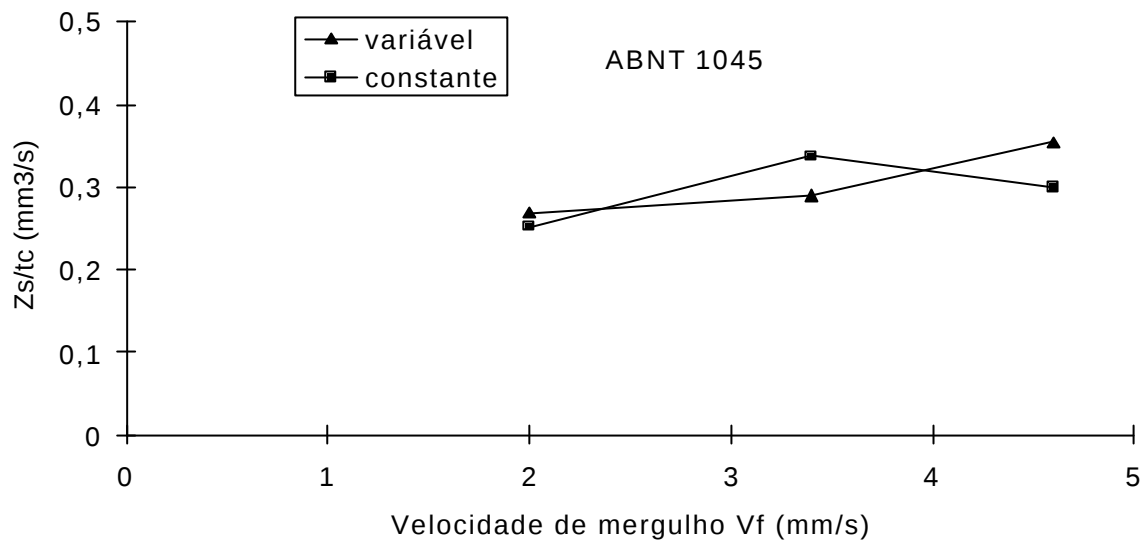


Figura 6.22: Resultados obtidos de taxa de desgaste do disco abrasivo em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1045.

No ensaio onde houve a quebra do disco abrasivo (v_{si} e $v_f = 4,6$ mm/s) o valor da taxa de desgaste volumétrico elevou-se. A análise deste ponto é prejudicada pelo fato de que o desgaste diametral do disco abrasivo não é uniforme, conforme (Mamin et al., 1989). Assim, como o número de cortes neste ensaio foi o menor de todos (60) e está sendo comparado com os ensaios que possibilitaram o maior número de cortes (aproximadamente 100 cortes para $v_f = 2,0$ mm/s e 160 para $v_f = 3,4$ mm/s) o ponto foi analisado numa região de desgaste diametral com comportamento diferente.

6.5 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do material (V_w/t_c)

O volume de material removido não variou em função das condições de corte com exceção dos ensaios onde houve travamento. Para uma análise global da capacidade de remoção dos discos abrasivos será utilizada a taxa de remoção volumétrica do material em cada ensaio, que é determinada pelo volume de material removido por unidade de tempo V_w/t_c [mm³/s].

6.5.1 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do aço ABNT 1020

Na figura 6.23 são apresentados os resultados obtidos da taxa de remoção volumétrica do material, para todos os ensaios com o aço ABNT 1020, em função da velocidade de mergulho.

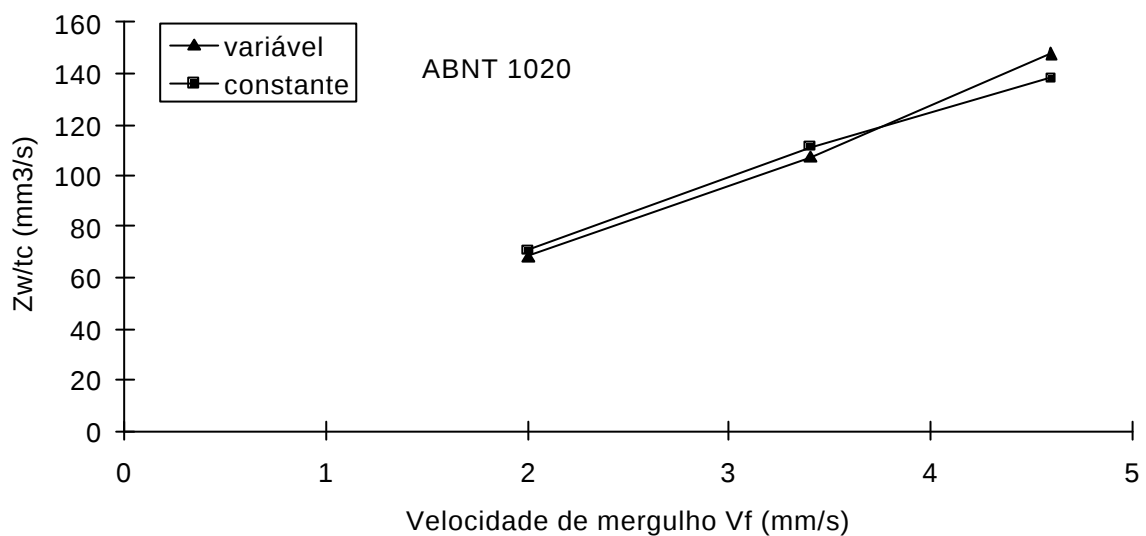


Figura 6.23: Resultados obtidos da taxa de remoção volumétrica do material, para todos os ensaios com o aço ABNT 1020, em função da velocidade de mergulho.

Pode-se notar que a taxa de remoção volumétrica do material é crescente com a elevação da velocidade de mergulho. Este crescimento é substancialmente maior se comparado com a taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo.

Assim, tem-se que os cortes realizados de forma mais severa, com maior v_f , proporcionaram o aumento da taxa de remoção volumétrica do material. Deve-se salientar que para o ensaio com velocidade de corte decrescente e com velocidade de mergulho elevada, a análise ficou prejudicada pelo travamento do disco abrasivo.

Nos ensaios com velocidade de corte constante, os valores obtidos tenderam a ser ligeiramente maiores do que os obtidos com velocidade de corte constante com $v_f = 2,0$ e $3,4$ mm/s, respectivamente.

6.5.2 - Influência da velocidade de mergulho na taxa de remoção volumétrica do aço ABNT 1045

Os valores da taxa de remoção volumétrica do material para o aço ABNT 1045, em função da velocidade de mergulho, são apresentadas na figura 6.24.

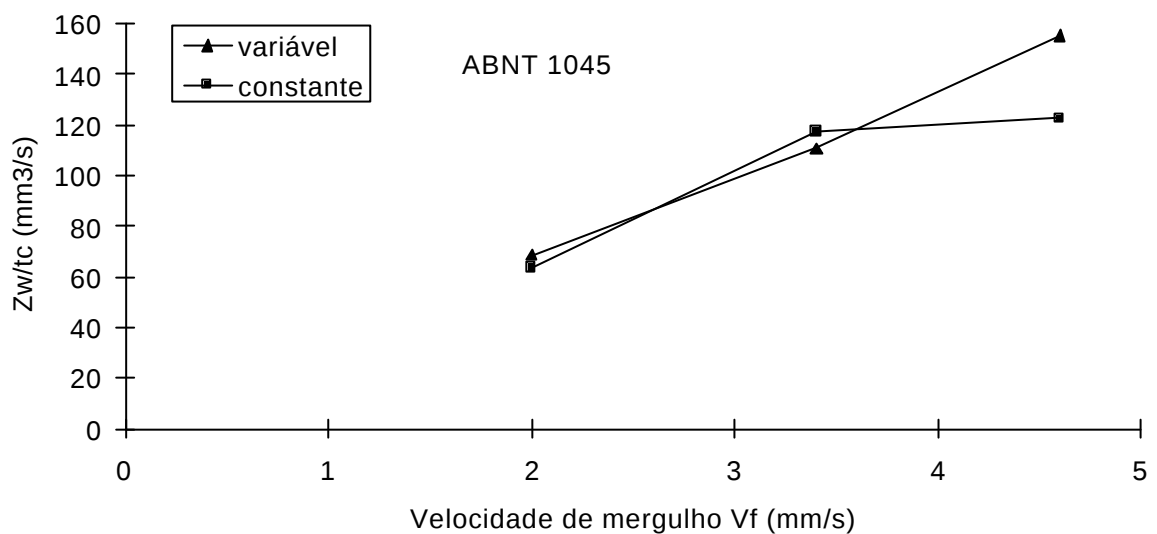


Figura 6.24: Resultados obtidos da taxa de remoção volumétrica do material, para todos os ensaios com o aço ABNT 1045, em função da velocidade de mergulho.

Para o aço ABNT 1045 os valores de taxa de remoção volumétrica do material também foram crescentes com a elevação da velocidade de mergulho e maiores do que a taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo.

Isto ocorre pelo menor desgaste diametral do disco abrasivo, que proporciona maiores volumes de material removido e pelo tempo de cada corte, que não é igual durante o ensaio. Se comparados com os resultados obtidos com o aço ABNT 1020, os valores foram inferiores.

6.6 - Resultados da relação G

Uma forma prática de se avaliar o comportamento de discos abrasivos submetidos a diversas condições de corte é através da relação G . Trata-se de uma variável que é facilmente quantificada e interpretada, principalmente pela utilização mais comum deste tipo de disco abrasivo, que é o corte de materiais sem a necessidade de controle dos possíveis erros geométricos da peça e de sua rugosidade superficial.

6.6.1 - Influência de v_f na relação G , para o aço ABNT 1020

Na figura 6.25 são apresentados os resultados de relação G , em função da velocidade v_f e das duas condições de velocidade de corte, para o aço ABNT 1020.

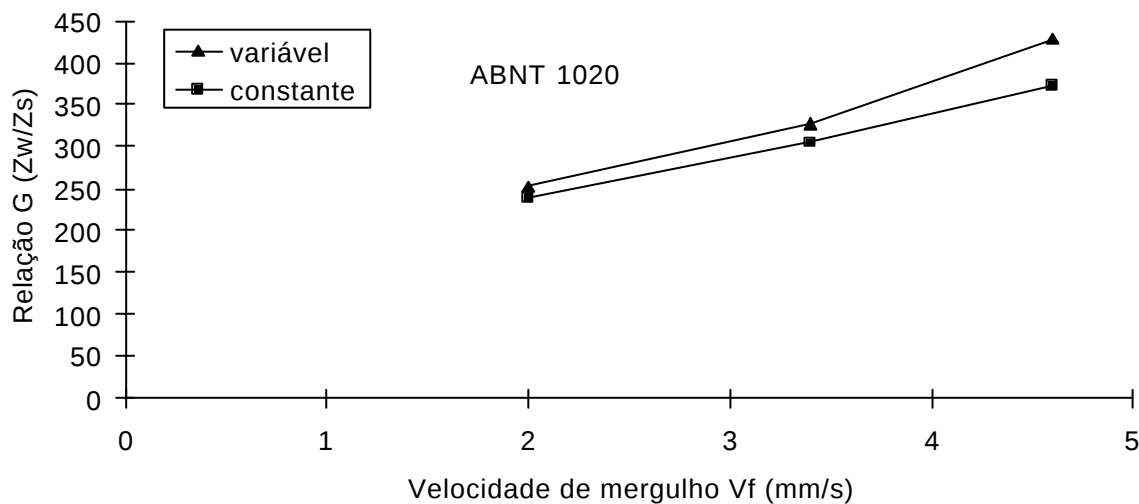


Figura 6.25: Resultados de relação G , em função da velocidade v_f e das duas condições de velocidade de corte, para o aço ABNT 1020.

Pode-se notar que para as duas condições de velocidade de corte utilizadas os valores de relação G foram crescentes com a elevação de v_f . Os resultados de relação G tenderam a

serem maiores quando foi utilizada velocidade de corte decrescente, mesmo quando houve o travamento do disco abrasivo no ensaio com velocidade de corte decrescente.

A ação erosiva da geometria do cavaco sobre o ligante pode ser verificada através da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados, que aumenta com a elevação de v_f , conforme pode ser verificado na figura 6.26.

Para a elaboração destas curvas utilizou-se a velocidade de corte final, que corresponde ao diâmetro externo final do disco abrasivo (230 mm), mesmo quando o disco abrasivo travou.

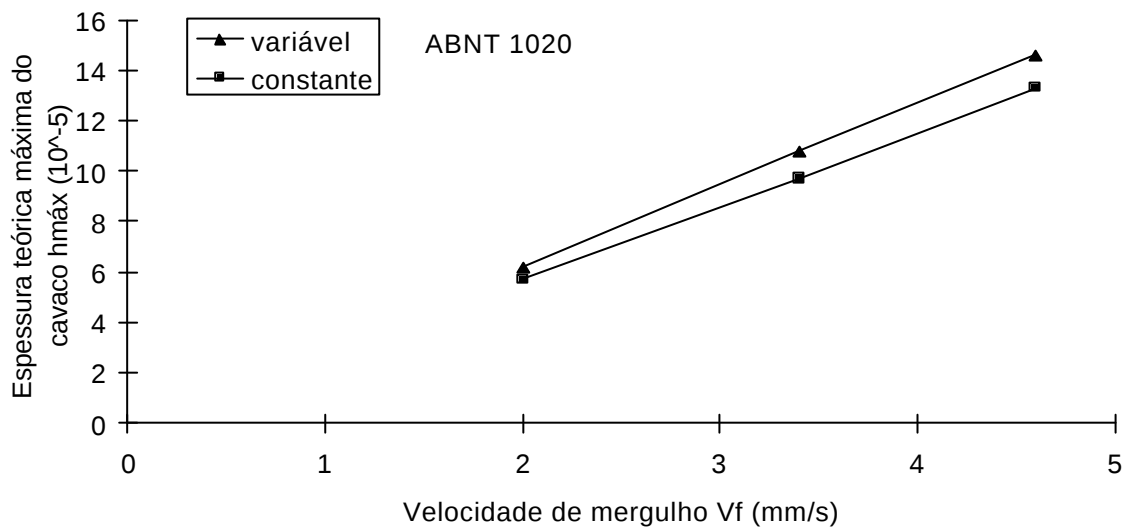


Figura 6.26: Resultados da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados, em função de v_f , para o aço ABNT 1020.

A espessura teórica máxima dos cavacos arrancados aumenta com a elevação de v_f e com a redução de v_{si} . Os cavacos com maior espessura teórica máxima deveriam desgastar mais o ligante, diminuindo os valores de relação G . Entretanto, nota-se que a relação G aumentou com a elevação de v_f . Assim, pode-se concluir que a espessura teórica máxima dos cavacos comprometeu pouco a relação G .

Os menores valores de relação G foram obtidos com os menores valores de v_f . Neste caso, os cavacos arrancados possuem menor espessura teórica máxima, o que deveria prolongar a permanência dos grãos abrasivos na superfície de corte do disco abrasivo, aumentando

do os valores de relação G . Isto não ocorreu, pois a ação da temperatura sobre o ligante, que ocorreu por mais tempo, foi mais danosa do que a ação da espessura do cavaco.

Como o tempo de corte foi maior, a energia térmica gerada pelos cortes foi conduzida por mais tempo em direção ao centro do disco abrasivo deteriorando a capacidade do ligante em reter os grãos abrasivos. Desse modo, a força máxima de retenção, que o ligante exerce sobre o grão abrasivo, diminuiu.

6.6.2 - Influência de v_f na relação G , para o aço ABNT 1045

Para o aço ABNT 1045 a tendência de crescimento da relação G foi idêntica ao que ocorreu com o aço ABNT 1020; ou seja, aumentou com a elevação de v_f , conforme pode ser verificado na figura 6.27.

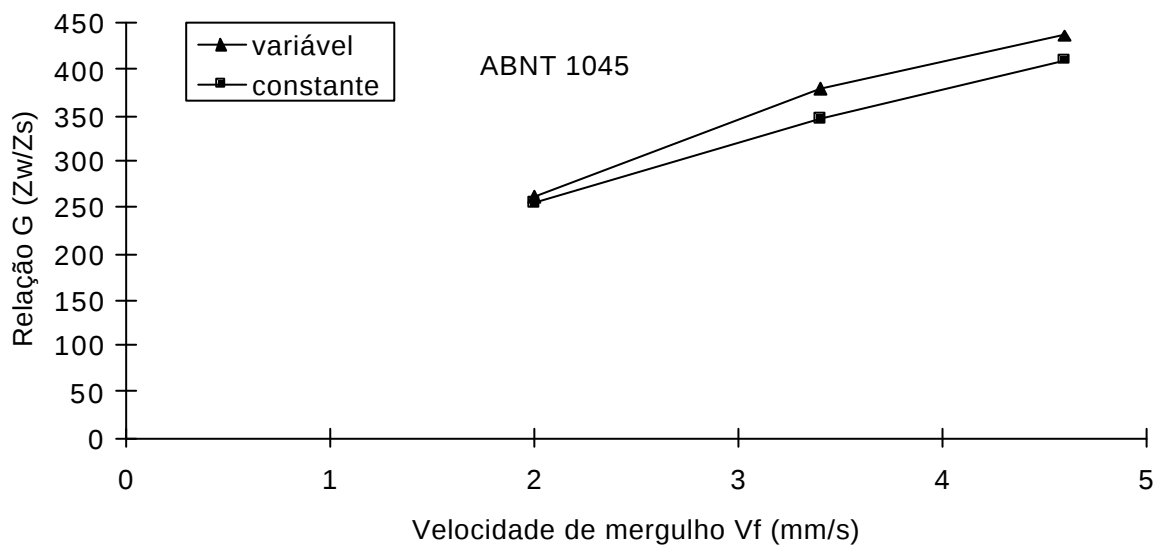


Figura 6.27: Resultados de relação G , em função da velocidade v_f e das duas condições da velocidade de corte, para o aço ABNT 1045.

O elevação de v_f aumentou a espessura teórica máxima dos cavacos arrancados de forma igual ao que ocorreu no aço ABNT 1020, conforme pode ser observado na figura 6.28.

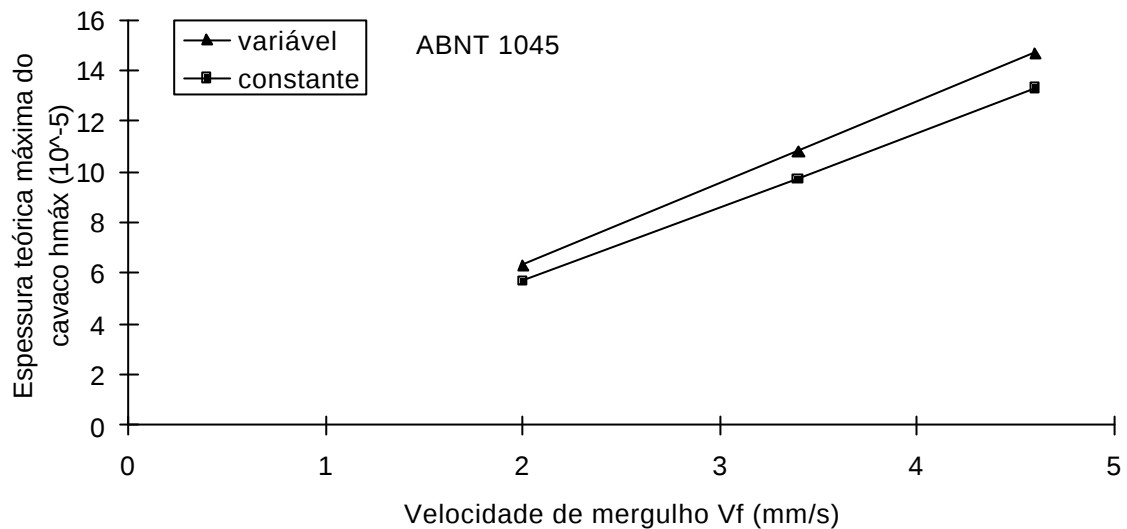


Figura 6.28: Resultados da espessura teórica máxima dos cavacos arrancados, em função de v_f , para o aço ABNT 1045.

Isto ocorre somente por se tratar de uma grandeza teórica. Entretanto, os resultados obtidos mostram que os valores da relação G foram maiores nos ensaios com o aço ABNT 1045 devido à sua geometria mais quebradiça, que possibilita uma menor degradação erosiva e térmica do ligante.

A elevação da espessura teórica máxima do cavaco aumentou os valores de relação G , confirmando a pouca influência desta espessura no desgaste da superfície de corte dos discos abrasivos.

Com velocidade de corte decrescente os valores de relação G foram maiores pela menor geração de calor.

Com a interpretação destes resultados pode-se então confirmar e concluir a teoria apresentada sobre os mecanismos de desgaste de discos abrasivos, em cortes do tipo mergulho basculante sem refrigeração.

A ação do macro desgaste, que é caracterizada pelo desprendimento dos grãos abrasivos da superfície de corte do disco abrasivo, ocorreu predominantemente pela degradação térmica do ligante, deteriorando a ligação entre os grãos abrasivos e o ligante, facilitando o desprendimento dos grãos da superfície de corte do disco abrasivo. Nos ensaios com v_f menor o macro desgaste foi maior

O micro desgaste ocorreu predominantemente nos ensaios onde a relação G foi maior, onde houve a retenção dos grãos da superfície de corte do disco abrasivo por mais tempo. Isto ficou evidenciado nos ensaios com maior v_f .

6.7 - Influência da velocidade de mergulho na força tangencial de corte média final

Do que foi apresentado, pode-se afirmar que o principal mecanismo de desgaste de discos abrasivos, quando utilizados sem refrigeração e em operações do tipo “cut-off” por mergulho basculante, é o macro desgaste que ocorre pela degradação térmica do ligante. Este mecanismo está diretamente relacionado com as condições de corte.

Com o aumento de v_f , elevam-se também a relação G e a espessura do cavaco arrancado; conseqüentemente, estas elevações refletem nos resultados de forças tangenciais de corte média.

Nas figuras 6.29 e 6.30 são apresentados os valores de força tangencial de corte média final em função de v_f , para os aços ABNT 1020 e ABNT 1045, respectivamente. Entende-se por força tangencial de corte média final o último valor utilizado na elaboração das 12 curvas de força tangencial de corte média x número de cortes.

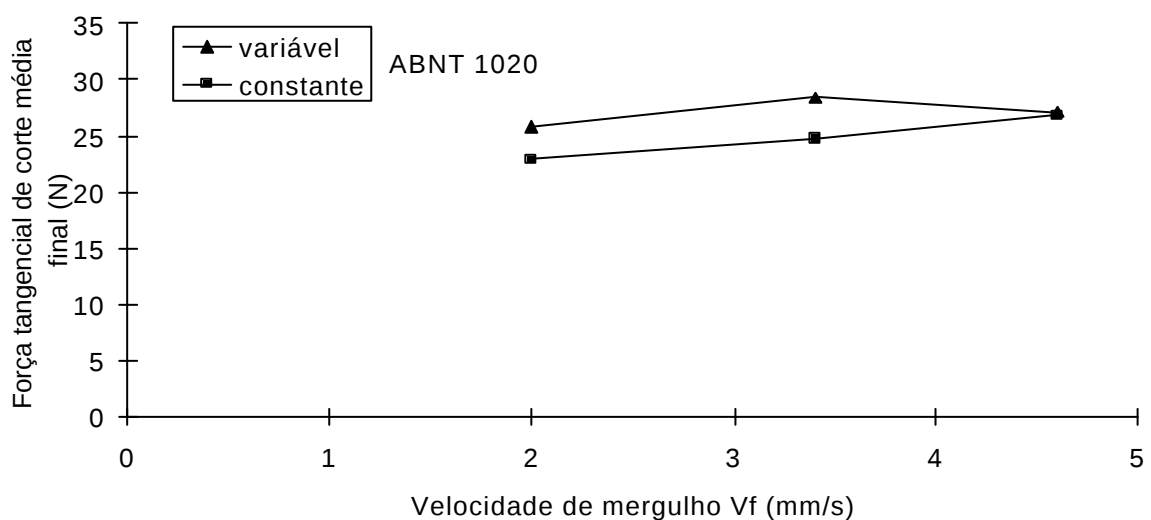


Figura 6.29: Resultados dos valores de força tangencial de corte média final em função de v_f , no aço ABNT 1020.

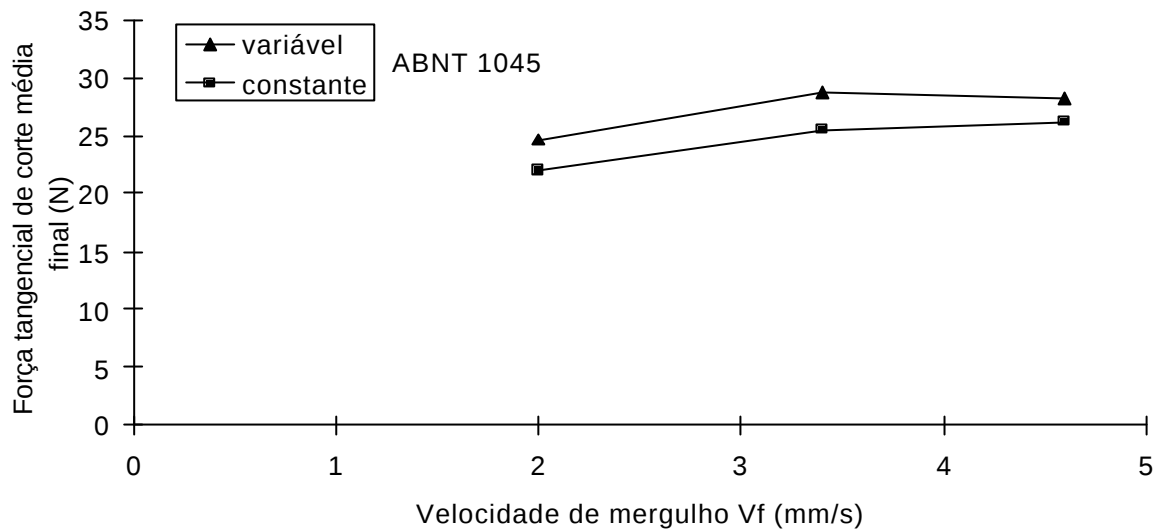


Figura 6.30: Resultados dos valores de força tangencial de corte média final em função de v_f , no aço ABNT 1045.

O aumento da relação G significa que o grão abrasivo é retido por mais tempo na superfície de corte do disco abrasivo. Os grãos abrasivos vão se desgastando e aumentando suas áreas de topo, promovendo o seu micro desgaste. Com isto, os valores de força tangencial de corte média aumentam. Isto pode ser confirmado nas figuras 6.29 e 6.30, que mostram a tendência da elevação da força tangencial de corte média final com o aumento de v_f .

6.8 - Influência da velocidade de mergulho no custo do corte por unidade de volume de material removido

Uma outra forma prática de se avaliar o comportamento de discos abrasivos, considerando o interesse econômico do processo, é através do custo do corte por unidade de volume de material removido. Trata-se de um enfoque econômico da relação G que atrai a atenção dos usuários, principalmente numa economia globalizada onde a procura pela otimização dos processos de fabricação é vital para a melhoria da produtividade.

Para as decisões de investimento numa empresa, deve-se conhecer as possibilidades tecnicamente seguras. Neste item são comentadas algumas possibilidades de decisões técnicas, baseadas nos resultados dos ensaios realizados.

Nas figuras 6.31 e 6.32 são apresentados os resultados do custo do corte por unidade de volume de material removido [R\$/mm³], em função da velocidade de mergulho para os aços ABNT 1020 e ABNT 1045, respectivamente.

A tendência de redução no custo do corte com discos abrasivos ocorreu pela elevação de v_f . No caso de velocidade de corte decrescente, o custo do corte tendeu a ser menor do que quando utilizou-se velocidade de corte constante. A potência solicitada do motor foi maior pela elevação da geometria dos cavacos arrancados. Assim, quando a velocidade de corte é decrescente, existe uma condição específica de corte onde v_f deve ser determinada experimentalmente.

Neste caso, o investimento inicial aumenta pela aquisição de um motor com maior potência e que consome, ao longo do trabalho, mais energia elétrica quando utilizado em condições mais severas de corte.

Para a velocidade de corte constante, a potência solicitada do motor foi menor pela menor geometria dos cavacos. Com a elevação de v_f , o custo do corte foi decrescente tendendo a um patamar que corresponde ao mínimo custo possível no corte. Para este caso, a aquisição de um inversor de frequência, para o controle da rotação do motor, é onerosa; porém o custo do motor é menor e ao longo do tempo o custo do inversor é amortizado. O consumo de energia elétrica é menor (com relação a velocidade de corte decrescente) pela necessidade de uma menor potência de corte, mesmo quando utilizado em condições mais severas de corte.

A utilização de motores setoriais é uma alternativa econômica, já que o custo deste motor é baixo e permite a variação da rotação de forma econômica. Pouco se tem proposto neste sentido, uma vez que este tipo de análise não é comum na literatura formal sobre discos abrasivos.

Uma outra forma de se manter a velocidade de corte constante é através da utilização de um sistema mecânico de mudanças de polia, desde que seja prático.

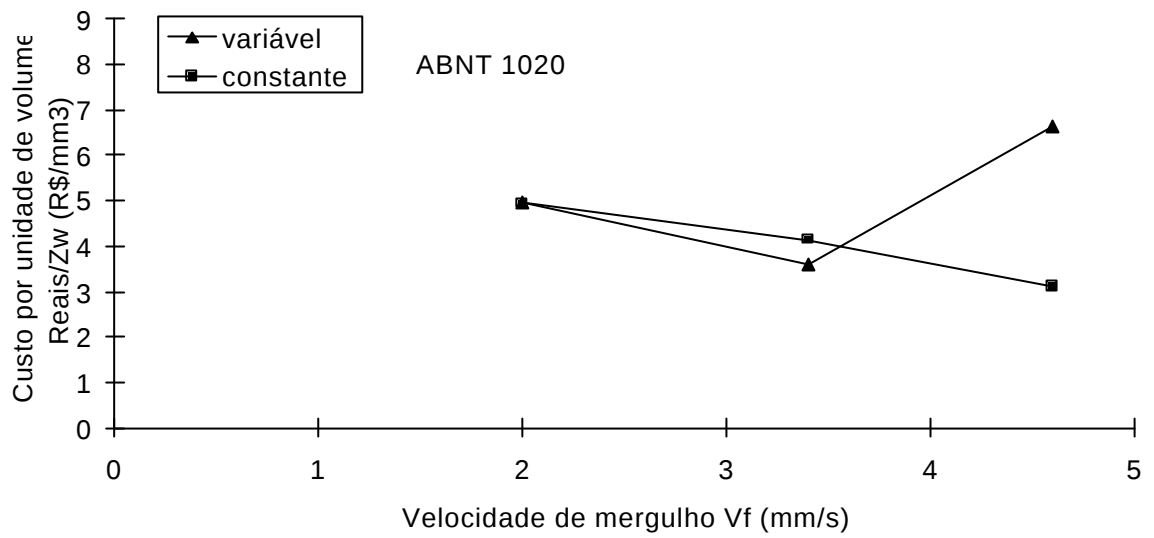


Figura 6.31: Resultados do custo do corte por unidade de volume de material removido, em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1020.

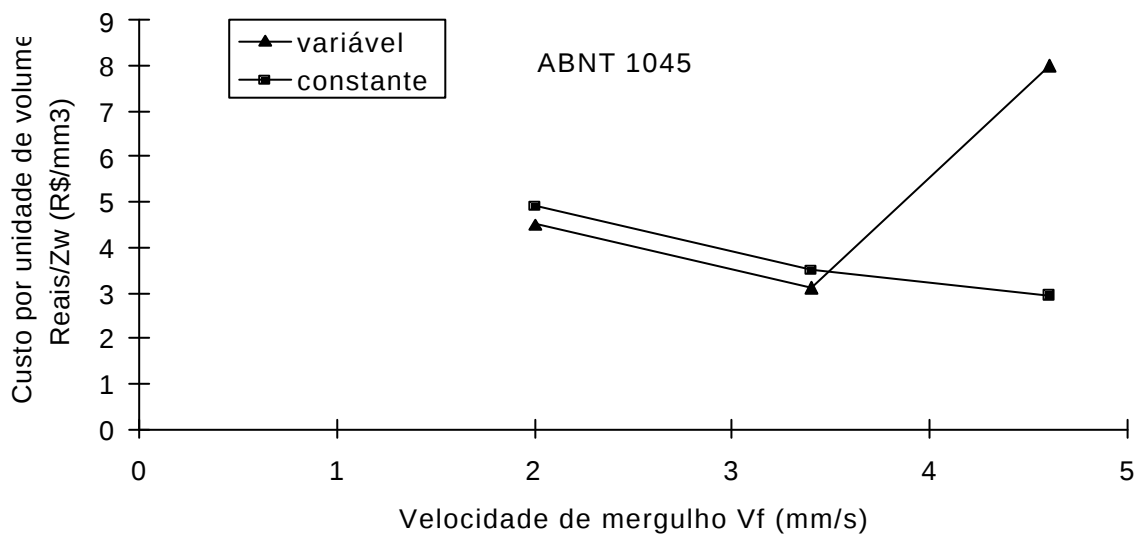


Figura 6.32: Resultados do custo do corte por unidade de volume de material removido, em função da velocidade de mergulho, no aço ABNT 1045.

7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

Analisando-se os resultados obtidos no processo de corte com discos abrasivos de materiais, do tipo mergulho basculante e sem refrigeração, pode-se concluir que:

No corte de materiais por discos abrasivos, os cavacos são arrancados de forma severa e possuem geometrias que estão diretamente relacionadas aos parâmetros velocidade de corte, velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça e dureza do material a ser cortado. Através da análise microscópica dos cavacos arrancados, pode-se afirmar que no corte de aços dúcteis os cavacos são mais longos e espessos e no corte de aços frágeis os cavacos são mais finos e quebradiços.

Quando a velocidade de corte é mantida constante, o aumento da espessura equivalente de corte e do ângulo de penetração ocorrem somente pela elevação da velocidade de mergulho, durante os sucessivos cortes.

A força tangencial de corte média varia em função da velocidade de mergulho, da velocidade de corte e da dureza do material a ser cortado, pelas modificações na espessura máxima dos cavacos arrancados.

Os valores de força tangencial de corte média, apresentaram a mesma tendência nos dois tipos de aço ensaiados; ou seja, as curvas tenderam a decrescer, quando foi utilizada a velocidade de corte constante, e permaneceram num patamar elevado e com tendência de crescimento, quando a velocidade de corte foi decrescente. Os valores de força tangencial de corte média foram menores nos ensaios com o aço frágil, pelo fato dos cavacos arrancados serem mais finos e quebradiços. Observou-se também que no aço frágil o volume de material removido foi maior e o empastamento da superfície de corte dos discos abrasivos foi menor, se comparado ao aço dúctil.

A velocidade de mergulho do disco abrasivo sobre a peça influenciou no número de cortes, na geometria do cavaco arrancado e no tempo de corte. Quando a velocidade de mergulho foi pequena, os cavacos arrancados apresentaram pequena espessura e o tempo de

contato foi maior. Isto faz com que haja uma maior migração de calor para o ligante. Pela ação prolongada da temperatura, há a deterioração do ligante (que degrada-se a 600 °C) que desprende mais facilmente os grãos abrasivos, o que provoca a diminuição do número de cortes.

Aumentando-se a velocidade de mergulho, o tempo de contato é menor e os cavacos são mais espessos. A ação da temperatura sobre o ligante ocorre em intervalos de tempo menores.

A elevação da velocidade de mergulho requer maior potência disponível para o corte, principalmente se a velocidade de corte for decrescente. Isto ocorre pelo aumento da espessura dos cavacos arrancados que acarretou em sucessivos travamentos do eixo árvore.

A taxa de remoção volumétrica do material foi crescente com a elevação da velocidade de mergulho. Este crescimento é substancialmente maior se comparado com a taxa de desgaste volumétrica do disco abrasivo. Assim, tem-se que os cortes realizados de forma mais severa, com maiores valores de velocidade de mergulho, proporcionaram o aumento da taxa de remoção volumétrica do material. Nos ensaios com velocidade de corte constante, os valores obtidos tenderam a ser maiores do que os obtidos com velocidade de corte constante. Para o aço ABNT 1045 os valores de taxa de remoção volumétrica do material foram inferiores os resultados obtidos com o aço ABNT 1020, pelo maior tempo total de corte.

Para as duas condições de velocidade de corte utilizadas os valores de relação G foram crescentes com a elevação da velocidade de mergulho. Os resultados de relação G tenderam a ser maiores quando foi utilizada velocidade de corte decrescente, mesmo quando houve o travamento do disco abrasivo no ensaio com velocidade de corte decrescente.

Os menores valores de relação G foram obtidos com os menores valores da velocidade de mergulho. Isto ocorreu pois a ação da temperatura sobre o ligante, que permanece por mais tempo, foi mais danosa do que a ação da espessura do cavaco.

O aumento da relação G foi obtido, em todos os casos, com a elevação da velocidade de mergulho. Isto significa que o grão abrasivo é retido por mais tempo na superfície de corte do disco abrasivo, prolongando a vida útil do disco.

A teoria sobre os mecanismos de desgaste de discos abrasivos, em cortes do tipo mergulho basculante sem refrigeração, pode ser concluída da seguinte forma: A ação do macro

desgaste ocorre predominantemente pela degradação térmica do ligante, deteriorando a ligação entre os grãos abrasivos e o ligante, facilitando o desprendimento dos grãos da superfície de corte do disco abrasivo. Nos ensaios com valores menores de velocidade de mergulho o macro desgaste foi maior. Trata-se do principal mecanismo de desgaste de discos abrasivos, quando utilizados sem refrigeração e em operações do tipo “cut-off” por mergulho basculante sem lubrificação.

O micro desgaste ocorre predominantemente nos ensaios onde a relação G foi maior, onde houve a retenção dos grãos da superfície de corte do disco abrasivo por mais tempo. Isto é evidenciado nos casos onde são utilizados maiores valores para a velocidade de mergulho.

A tendência de redução no custo do corte com discos abrasivos ocorreu pela elevação da velocidade de mergulho. No caso da velocidade de corte decrescente, o custo do corte tendeu a ser menor do que quando utilizou-se velocidade de corte constante. A potência solicitada do motor foi maior pela elevação da geometria dos cavacos arrancados. Assim, quando a velocidade de corte é decrescente, existe uma condição específica de corte onde a velocidade de mergulho deve ser determinada experimentalmente.

Como sugestões para novos trabalhos tem-se:

Estudo detalhado dos efeitos térmicos no corte com discos abrasivos, no material e no disco abrasivo, com a utilização de medidores de temperatura.

Estudar os possíveis tipos de ligantes que sejam mais resistentes a ação da temperatura.

Estudar os efeitos da dureza dos discos abrasivos no corte de materiais frágeis e dúcteis.

Estudar formas de investimento na indústria que utiliza discos de corte, com ênfase na aquisição de motores com potência adequada e/ou inversores de frequência para as condições de corte desejadas. Além disto pode-se avaliar a possibilidade de utilização de motores setoriais ou de sistema mecânico de mudanças de velocidade através de polias.

BIBLIOGRAFIA CITADA

(de acordo com a Norma para Publicações da UNESP,
Volume 4 – DISSERTAÇÕES E TESES)

ABRÃO, A.M. Sistema para avaliação de desempenho térmico de pares disco: peça em re-tificação. São Carlos, 1991. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Norma NBR 7731 – Medição do ruído – 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Norma NBR 10151 – Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – Norma NBR 1052 – Níveis de ruído para conforto acústico (NB 95) – 1990.

BIANCHI, E.C. Ação da geometria teórica do cavaco no desgaste de rebolos de CBN com ligante resínóide. São Carlos, 1992. 152p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BIANCHI, E.C., YOKOYAMA, E.M., SANCHEZ, L.E.A., GONÇALVES, G.M.B., KOBAYASHI, Y., FERNANDES, O.C., AGUIAR, P.R. O controle da velocidade de corte com discos abrasivos aumenta a produtividade. Revista Máquinas e Metais, Ano XXXI, n. 357, p. 30 – 40, 1995 a.

BIANCHI, E.C., YOKOYAMA, E.M., SANCHEZ, L.E.A., GONÇALVES, G.M.B., KOBAYASHI, Y., FERNANDES, O.C., AGUIAR, P.R. O tempo de corte com discos abrasivos pode ser otimizado pelo controle da velocidade de corte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 13, CONGRESSO IBEROAMERI-

CANO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2, Belo Horizonte. Anais ... São Paulo: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1995 b, 4 p. (em CD – ROM).

BIANCHI, E.C., YOKOYAMA, E.M., SANCHEZ, L.E.A., GONÇALVES, G.M.B., KOBAYASHI, Y., FERNANDES, O.C., VALARELLI, I.D.D., AGUIAR, P.R. Otimização do processo de corte com discos abrasivos. In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4, 1996, Recife. Anais ... Recife: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1996. p. 301 - 306.

BRASIL – Lei nº 6515, portaria nº 3214 – NR 15 – Atividades insalubres.

BRINKSMEIER, E., MINKE, E. High-performance Surface Grinding - The Influence of Coolant on the Abrasive Process, In Annals of the CIRP. 1993. vol 42/1, p. 367-370.

DI GIACOMO, B. Aspectos metrológicos em engenharia de precisão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MECÂNICA DE PRECISÃO, 1, 1988, São Paulo, 51 p.

DORNFELD, D., LIU BILL, J.J. Abrasive Texturing and Burnishing Process Monitoring Using Acoustic Emission, In Annals of the CIRP. 1993. vol 42/1, p. 397-400.

FARAGO, F.T. Abrasive Methods Engineering. Vol 2. Industrial Press. Inc., New York, USA. 1980. p. 435-459.

FERNANDES, J.C. O Ruído Ambiental: seus efeitos e seu controle. Bauru: Faculdade de Engenharia e Tecnologia de Bauru, 1985, 82 p. (mimeogr.).

HAHN, R.S., LIDSAY, R.P. The wheel removal parameter. In: Principles of grinding. Machinery. September, 1971. parte III. p. 33-39.

JOHNSON, P. E. Cut your cut-off wheel cost down to size. Welding Journal, v. 68, n. 7, p. 57-8, 1989.

- LUTHER, N. B. Improved grinding and cut-off technology for today's foundry. Modern Casting, v. 85, s/n, p. 35-8, 1995.
- MACINTYRE, A.J. Ventilação industrial e controle da poluição. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990. 403 p.
- MALKIN, S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. England: Ellis Horwood Limited, 1989. 275p.
- MALKIN, S., RITTER, J. E. Grinding mechanisms and strength degradation for ceramics. Journal of Engineering for Industry, v.111, n. 5, p. 167-74, 1989.
- MAMIN, Kh. A., LUPINOVICH, L. N., GLINNER, V. Ya. Wear analysis of abrasive parting-off discs and certain methods for lengthening their life. Soviet Engineering Research, v. 69, n. 5, p. 65-8, 1989.
- NORTON. NTP043: normas técnicas de produtos. São Paulo: gerência de produto – abrasivos / engenharia de produto, 1994, 89 p. (mimeogr.)
- MALKIN, S. Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives. England: Ellis Horwood Limited, 1989. 275p.
- NUSSBAUM, G. Ch. e DICASTILHO, J. M. L. Discos & Abrasivos: tecnologia básica. São Paulo: Ícone, 1988. v.3, c.4, p.414-21.
- PETERS, J, DECNEUT, A. L'espaisseur de coupe equivalente, parametre determinat in rectification. Mechaniques Materiaux eletricité, v.58, n. 310, p. 22-30. 1975.
- RASTETTER, E. Abrasive cutting, a new method for cutting wear-resistant and high-strength sheet and plate. Metallurgical plant and technology international, v. 16, n. 1, p.28-9, 1993.

ROWE, W.B., BLACK, S.C.E., MILLS, B., QI, H.S., MORGAN, M.N. Experimetal Investigation of Heat Transfer in Grinding, In Annals of the CIRP. 1995. vol 44/1, p. 329-332.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DE ABRASIVOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINAESP). Movimento geral das estatísticas do setor: exercício de 1996. São Paulo: Sindicato Da Indústria de Abrasivos do Estado de São Paulo, 1997. 2p.

SNEE, J. Are You Making the Most of Your Cut-Off Operation? Welding Journal, v. 2, n. 7, p. 60-2, 1991.

TOMÉ, S., CAPOBIANCO, M.H. Toxicologia. Bauru: Faculdade de Engenharia e Tecnologia de Bauru, 1995, 75 p. (mimeogr.).

UEDA, T., SATO, M., SUGITA, T., NAKAYAMA, K. “Thermal Behaviour of Cutting Grain in Grinding”, In Annals of the CIRP, vol 44/1, (1995), p325-328.

UEDA, T., TANAKA, H., TORII, A. “Measurement of Grinding Temperature of Active Grains Using Infrared Radiation Pyrometer with Optical Fiber”, In Annals of the CIRP, vol 42/1, (1993), p405-408.

VALARELLI, I.D.D. Ventilação Industrial. Bauru, Faculdade de Engenharia e Tecnologia, 1995. 104 p. (mimeogr.).

WELLNER, P. Investigations on the effect of the cutting operation on the surface deformation of different materials. Practical metallography, n. 17, p. 525-35, 1980.