

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DOS EFEITOS GERADOS PELOS PARÂMETROS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DAS PEÇAS EM AÇO ABNT 4340**

MSc. ANDRÉ DE LIMA

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2008

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DOS EFEITOS GERADOS PELOS PARÂMETROS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DAS PEÇAS EM AÇO ABNT 4340**

MSc. ANDRÉ DE LIMA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNIMEP, como exigência parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Milton Vieira Júnior.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2008

**ANÁLISE DOS EFEITOS GERADOS PELOS PARÂMETROS DE CORTE
EM PROCESSOS DE USINAGEM SOBRE A INTEGRIDADE
SUPERFICIAL DAS PEÇAS EM AÇO ABNT 4340**

MSC. ANDRÉ DE LIMA

Tese de Doutorado defendida e aprovada, em 29 de Agosto de 2008, pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Milton Vieira Junior
Orientador
Universidade Nove de Julho - UNINOVE

Prof. Dr. Elesandro Antonio Baptista
Universidade Nove de Julho – UNINOVE

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez
Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP

Prof. Dr. Iris Bento da Silva
Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Prof. Dr. Rodolfo Libardi
Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

À Deus,
à Nossa Senhora,
aos meus pais Dorival e Odete,
à minha esposa Mónica
e a todas as pessoas que amo.

AGRADECIMENTOS

À minha família e aos meus amigos, pessoas importantes que se fizeram presentes nesta conquista.

Aos meus pais Dorival e Odete, pelo carinho e pelos ensinamentos recebidos que tanto me influenciaram. A Katia e Daniela, minhas irmãs, pelo incentivo dado nas horas difíceis.

À minha esposa Mônica, pela compreensão, carinho e estímulo ao longo de toda esta jornada.

Ao professor Milton Vieira Júnior pela orientação, compreensão e incentivo dispensado para o desenvolvimento deste trabalho, além da grande amizade.

Aos professores doutores Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Elesandro Antonio Baptista, Iris Bento da Silva e Rodolfo Libardi, componentes da banca examinadora, pelas valiosas contribuições dispensadas a este estudo.

Ao professor e amigo Elesandro Antonio Baptista pelo apoio e incentivo dispensado para o desenvolvimento deste trabalho, além da grande amizade.

Aos técnicos do Laboratório de Fabricação Mecânica, Processos de Automação e de Materiais de Construção Mecânica da UNIMEP, pelo auxílio na realização dos ensaios e de algumas análises.

Ao professor Nivaldo Lemos Coppini pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho.

À EATON e aos funcionários Cláudio Luis Ferreira e Antonio Carlos Zambom, pela colaboração direta com as análises realizadas.

À LABTESTE e seus proprietários e funcionários, pelo auxílio na realização das análises.

À Titex e Sandvik do Brasil, pelo apoio técnico e financeiro.

Ao IFM, pelo apoio financeiro.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

“É praticamente impossível prever a performance no corte dos metais. Entretanto, isto não quer dizer que estudos detalhados dos processos de usinagem não têm valor. Cada ponto fundamental que é detalhadamente estudado e propriamente interpretado contribui para o entendimento do processo, e o entendimento é o passo mais próximo da capacidade de prever”.

Dr. Milton Clayton Shaw

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar no sonho que se tem”.

Renato Russo

Músico e poeta brasileiro

LIMA, André. **Análise dos Efeitos Gerados Pelos Parâmetros de Corte em Processos de Usinagem Sobre a Integridade Superficial das Peças em Aço ABNT 4340**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Pretende-se com o presente trabalho, identificar os efeitos gerados pelos parâmetros de corte (variável independente de entrada), na integridade superficial e subsuperficial de peças (variável dependente de saída) confeccionadas em aço ABNT 4340, submetidas a processos de usinagem. São abordados os processos de retificação cilíndrica, torneamento, fresamento de topo e furação, visando melhorar o desempenho de peças e componentes de empresas que utilizam o processo de usinagem para confeccioná-los. Para se tornar possível a realização deste estudo foi necessária ensaios experimentais com os processos citados, variando as condições de usinagem. Após tais ensaios, foram desenvolvidas análises aprofundadas no material dos corpos de prova usinados, visando a identificação de dados pertinentes ao comportamento da integridade superficial e subsuperficial dessas peças. Como objeto principal almeja-se verificar qual ou quais parâmetros de usinagem promovem maiores alterações à integridade superficial de peças usinadas. Durante estes ensaios são trabalhadas condições diversificadas de usinagem, visando com isso, identificar a participação de cada um dos parâmetros de corte (V_c , a_p , f_n , f_z , D/P , dureza do material, com e sem lubri-refrigeração) nas características analisadas.

Palavras Chave: Integridade Superficial, Processos de Usinagem, Microdureza, Tensão Residual, CAC (Camada Afetada pelo Calor)

LIMA, André de. **Analysis of the Effects Produced By the Parameters of Cut in Machining Processes about to Surface Integrity of Piece in ABNT 4340 Steel.** 2008. Thesis (Given the doctor's degree in Industrial Engineering) – in Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Architecture and Town Planning, Methodist University of Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

ABSTRACT

The present research to identify the effects produced by the parameters of cut, in the surface and subsurface entirety of pieces made in ABNT 4340 steel, subjected to machining processes. There will be boarded the processes of cylindrical grinding, turning, milling and drilling process, aiming at the identification of proceedings to be carried out with the purpose of securing the total quality of the products made by these machining processes. Aiming to improve the performance of pieces and components of enterprises that use the machining process to make them. In order that the realization of this study became possible the realization of experimental tests was necessary with the quoted processes, after such tests, there were developed analyses gone deeper into the material condition of the specifics, aiming at the identification of relevant data to the behavior of the surface and subsurface entirety of these pieces. The present work has as principal object identifies which parameters promote bigger alterations to surface integrity of workpieces, in the principal machining processes (turning, milling, drilling and grinding). During these tests diversified conditions will be worked of machining, aiming with that, to identify the participation of each one of the parameters of cut in the analyzed characteristics.

Key words: Surface Integrity, Machining Process, Using Process, Microhardness, Residual Stress, HAZ (Heat Affected Zone)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: CAC em aço ABNT 4340 processo de furação.	26
Figura 2: Regiões de solicitação do processo de usinagem.....	29
Figura 3: Análise dupla da CAC (microdureza e microestrutura).....	30
Figura 4: Análise de imagem.....	31
Figura 5: Penetrador e Impressão Vickers.....	34
Figura 6: Roteiro de Experimento	51
Figura 7: CP para ensaios de torneamento	56
Figura 8: CP Temperado/Revenido após ensaios de torneamento	57
Figura 9: Analisador de Tensão Residual.....	60
Figura 10: Imagens de análise de desgaste das arestas de corte.....	64
Figura 11: CP no ensaio de retificação, pistas (109-111).....	68
Figura 12: CP após ensaio RBSF	70
Figura 13: Verificação de posicionamento da ferramenta.....	71
Figura 14: Inspeção de desgaste da broca	72
Figura 15: CP do ensaio FUBSF	72
Figura 16: Conjunto de Análises Desenvolvidas.....	73
Figura 17: Detalhe da análise de rugosidade dos ensaios de torneamento.....	74
Figura 18: Detalhe da análise de rugosidade (FBSF).....	76
Figura 19: Região de análise da rugosidade superficial (FUBSF)	76
Figura 20: Formato das amostras dos ensaios	80
Figura 21: Borda de ataque.....	82
Figura 22: Pequenas esferas metálicas.	82
Figura 23: Imagem de medição de secção da esfera metálica.....	83
Figura 24: Determinação da profundidade atingida	84
Figura 25: Definição do percurso do penetrador	86
Figura 26: Posicionamento da impressão na amostra.....	87
Figura 27: Detalhe de medição da microdureza	88
Figura 28: Exemplos de medições da microdureza	89
Figura 29: Calibração do software.....	91
Figura 30: Análise metalográfica	92
Figura 31: Análise da CAC	92
Figura 32: Localização dos pontos de análise de tensão	93
Figura 33: Gráfico preliminar de análise com agrupamento por V_c	96
Figura 34: Gráfico preliminar de análise com agrupamento por f_n	97
Figura 35: Comportamento da rugosidade superficial do TBSF.....	98
Figura 36: Comportamento da rugosidade superficial do TBCF	100
Figura 37: Comportamento da rugosidade superficial do TTCF.....	101
Figura 38: Comportamento da rugosidade superficial do TTSF.....	102
Figura 39: Relação entre o resultado dos ensaios.....	103
Figura 40: Comportamento da rugosidade superficial do RTCF	105
Figura 41: Comportamento da rugosidade superficial do FBSF.....	106
Figura 42: Comportamento da rugosidade superficial do FUBSF	109
Figura 43: Estrutura inicial dos materiais.....	110
Figura 44: Análise metalográfica e CAC no ensaio TBSF (amostra 8 e 15)	112

Figura 45: Análise metalográfica e CAC no ensaio TBCF (amostra 34 e 50).....	112
Figura 46: Gráficos dos valores de CAC dos ensaios TBSF e TBCF.....	113
Figura 47: Análise metalográfica da CAC no ensaio TTSF (amostra 55).....	114
Figura 48: Análise metalográfica da CAC no ensaio TTCF (amostra 86 e 100).....	115
Figura 49: Gráficos dos valores de CAC dos ensaios TTSF.....	115
Figura 50: Gráficos dos valores de CAC dos ensaios TTCF.....	116
Figura 51: Análise metalográfica da CAC no ensaio RTCF (amostra 112).....	117
Figura 52: Gráfico dos valores da CAC dos ensaios RTCF.....	118
Figura 53: Análise metalográfica e da CAC, ensaio FBS F (amostra 128 e 144).....	119
Figura 54: Gráficos dos valores de CAC dos ensaios FBSF.....	119
Figura 55: Análise metalográfica e CAC no ensaio FUBSF (amostra 148 e 162).....	120
Figura 56: Gráficos dos valores de CAC dos ensaios FUBSF.....	121
Figura 57: Gráficos de tensão residual dos ensaios TBSF e TBCF.....	122
Figura 58: Gráficos de tensão residual dos ensaios TTSF e TTCF.....	124
Figura 59: Gráficos de tensão residual dos ensaios RTCF.....	125
Figura 60: Gráficos de tensão residual dos ensaios FBSF.....	126
Figura 61: Gráficos de tensão residual dos ensaios FUBSF.....	127
Figura 62: Resultado de dureza HRC no ensaio TBSF.....	129
Figura 63: Resultado da análise de dureza HRC ensaio TBCF.....	131
Figura 64: Resultado da análise de dureza HRC ensaio TTSF.....	133
Figura 65: Resultado da análise de dureza HRC ensaio TTCF.....	136
Figura 66: Resultado da análise de dureza HRC ensaio RTCF.....	138
Figura 67: Resultado da análise de HRC ensaio FBSF.....	140
Figura 68: Resultado da análise de HRC ensaio FUBSF.....	143
Figura 69: Análise de Microdureza ensaio TBSF (V_c 3).....	147
Figura 70: Análise de Microdureza ensaio TBCF (V_c 1).....	148
Figura 71: Análise de Microdureza no ensaio TTSF e TTCF (V_c 2).....	149
Figura 72: Análise de Microdureza no ensaio RTCF (a_p 1).....	150
Figura 73: Análise de Microdureza no ensaio FBSF (a_p 1).....	151
Figura 74: Análise de Microdureza ensaio FUBSF (D/P1 e D/P2).....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de aplicação da análise da CAC.....	111
---	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Origens de Tensões Residuais	38
Quadro 2: Análise química do aço ABNT 4340	53
Quadro 3: Parâmetros de cortes utilizados	63
Quadro 4: Parâmetro de corte utilizado	66
Quadro 5: Combinação dos parâmetros utilizados no ensaio	67
Quadro 6: Parâmetros de corte do ensaio de fresamento	69
Quadro 7: Combinação dos parâmetros	69
Quadro 8: Parâmetros de corte do ensaio FUBSF	70
Quadro 9: Combinação dos parâmetros para ensaio	71
Quadro 10: Rugosidade Superficial: Amostras com Parâmetros de Corte Similares	103
Quadro 11: Representação dos valores médios de Ra	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μm	Unidade de medida em Mícron
15N	Unidade de medida de Dureza Superficial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
a_p	Profundidade de Corte
As	Arsênio
B	Boro
Bi	Bismuto
C	Carbono
Ca	Cálcio
CAC	Camada Afetada pelo Calor
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
Ce	Cério
CIRP	<i>International Conference on Research Production</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Cp	Corpo de Prova
Cr	Crômio
Cut-Off	Comprimento de amostragem para rugosidade
Cv	Cavalo vapor
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e.V.</i> (DIN; in English, <i>The German Institute for Standardization</i>)
FBSF	Ensaio de Fresamento de Aço Beneficiado Sem Fluido de Corte
Fe	Ferro
f_n	Velocidade por dente
FUBSF	Ensaio de Furação de Aço Beneficiado Sem Fluido de Corte
f_z	Avanço por Aresta de Corte
g	Unidade de Medida de Carga Aplicada em Gramas
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
HRC	Unidade de Dureza Rockwell C – N/mm
HV	Unidade de Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L	Comprimento
D/P	Relação entre a Profundidade do Furo e o Diâmetro da Broca
La	Lantânio
Lean	Enxuto
M	Metro
m/min	Metros por minuto
m/s	Metros por segundo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
mm	Milímetro
Mm/rev.	Milímetros por revolução
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MPa	Unidade de medida de tensão (mega pascal)
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pb	Chumbo

Ra	Rugosidade Média Aritmética
RPM	Rotação por Minuto
RTCF	Ensaio de Retificação de Aço Temperado/revenido Com Fluido de Corte
Ry	Rugosidade máxima
Rz	Distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos medidos
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
TBCF	Ensaio de Torneamento de Aço Beneficiado Com Fluido de Corte
TBSF	Ensaio de Torneamento de Aço Beneficiado Sem Fluido de Corte
TTCF	Ensaio de Torneamento de Aço Temperado/revenido Com Fluido de Corte
TTSF	Ensaio de Torneamento de Aço Temperado/revenido Sem Fluido de Corte
V	Vanádio
V _c	Velocidade de Corte
W	Tungstênio
Zn	Zinco
Zr	Zircônio

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	Problema da Pesquisa	20
1.2.	Hipótese	20
1.3.	Objetivo	20
1.3.1.	Objetivos Específicos	21
1.4.	Relevância	21
1.5.	Metodologia de Pesquisa	22
1.6.	Estrutura do trabalho	23
2.	INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	25
2.1.	Camada Afetada Pelo Calor (CAC) e Alteração Microestrutural	26
2.2.	Microdureza e Dureza Superficial	32
2.3.	Tensões Residuais	35
2.4.	Rugosidade Superficial.....	43
2.5.	Análise da Integridade Superficial	45
2.6.	Problemas decorrentes da quebra da integridade superficial.....	45
3.	EFEITO DE PARÂMETROS DE USINAGEM – CASOS JÁ ESTUDADOS.....	47
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1.	Material dos Corpos de Prova	52
4.2.	Máquinas-Ferramentas	53
4.3.	Ferramentas	54
4.4.	Corpos de Prova	55
4.5.	Instrumentos de Medição Utilizados	58
4.5.1.	Rugosímetro Digital	58
4.5.2.	Microdurômetro.....	58
4.5.3.	Duromêtro.....	58
4.5.4.	Microscópio Metalográfico	59
4.5.5.	Analisador de Tensão Residual	59
4.6.	Descrição dos Ensaios Desenvolvidos	60
4.6.1.	Descrição do Ensaio de Torneamento	61
4.7.	Descrição do Ensaio de Retificação	65
4.8.	Descrição do Ensaio de Fresamento.....	68
4.9.	Descrição do Ensaio de Furação.....	70
4.10.	Procedimento Experimental das Análises Desenvolvidas.....	72
4.10.1.	Descrição da Análise de Rugosidade Superficial	73
4.10.2.	Descrição da Análise de Dureza Superficial	77
4.10.3.	Preparação Metalográfica das Amostras	78
4.10.4.	Descrição da Análise de Microdureza	86
4.10.5.	Descrição da Análise metalográfica e da CAC	89
4.10.6.	Descrição da análise d tensão residual	93
5.	RESULTADOS DAS ANÁLISES DE INTEGRIDADE	95
5.1.	Análise da Rugosidade Superficial.....	95
5.1.1.	Análise de Ra Processo de Tornado	97
5.1.2.	Análise de Ra Processo de Retificação	104
5.1.3.	Análise de Ra Processo de Fresamento	106
5.1.4.	Análise de Ra Processo de Furação.....	108
5.2.	Análise da CAC e análise metalográfica	109
5.2.1.	Análise de CAC no Processo de Tornado	111
5.2.2.	Análise de CAC no Processo de Retificação.....	117

5.2.3.	Análise de CAC no Processo de Fresamento	118
5.2.4.	Análise de CAC no Processo de Furação	120
5.3.	Análise de Tensão Residual.....	121
5.3.1.	Análise de Tensão Residual no Processo de Torneamento	122
5.3.2.	Análise de Tensão Residual no Processo de Retificação	125
5.3.3.	Análise de Tensão Residual no Processo de Fresamento	126
5.3.4.	Análise de Tensão Residual no Processo de Furação.....	126
5.4.	Análise de Dureza Superficial	128
5.4.1.	Análise de Dureza Superficial no Processo de Torneamento.....	128
5.4.2.	Análise de Dureza Superficial no Processo de Retificação.....	137
5.4.3.	Análise de Dureza Superficial no Processo de Fresamento	140
5.4.4.	Análise de Dureza Superficial no Processo de Furação	142
5.5.	Análise de Microdureza.....	145
5.5.1.	Análise de MicroDureza no Processo de Torneamento.....	146
5.5.2.	Análise de MicroDureza no Processo de Retificação.....	149
5.5.3.	Análise de MicroDureza no Processo de Fresamento	151
5.5.4.	Análise de MicroDureza no Processo de Furação	151
6.	CONCLUSÃO.....	154
✓	Processo de Torneamento	156
✓	Processo de Retificação	157
✓	Processo de Fresamento	158
✓	Processo de Furação	159
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	161
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
9.	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	168
10.	ANEXOS	174
11.	APÊNDICES	176

1. INTRODUÇÃO

Dentro da nova realidade de mercado, independente do setor, há uma mentalidade voltada para os conceitos “Lean” e a cobrança por melhores resultados passa, não mais a ser uma característica desejada, e sim um pré-requisito básico para a sobrevivência das empresas. Itens como redução de tempo de processos, redução de custo com ferramentais e a eliminação da utilização de fluidos de cortes em processos de usinagem passam a serem itens buscados, incessantemente, no dia-a-dia das empresas.

Essa exigência de mercado propicia um cenário facilitador da ocorrência de danos à integridade superficial das peças usinadas. Este fato torna-se uma grande preocupação, para os diversos segmentos do mercado que utiliza do processo de usinagem como parte do processo de confecção de seus produtos, em função de que alguns desses danos não podem ser detectados por meio de inspeções e análises, comumente realizadas nas indústrias, o que acaba aumentando os riscos de introdução de produtos no mercado com sua qualidade comprometida e, conseqüentemente, pondo em risco a imagem da empresa e em alguns casos colocando em risco a segurança dos consumidores (LIMA, 2002).

Em função das variações de temperatura e de força no momento da remoção do material das peças no processo de usinagem, as peças (componentes) podem apresentar em suas superfícies usinadas danos provocados por estas condições. Alguns setores como o automobilístico e o aeronáutico, devem ter redobrado o seu controle, devido a algumas particularidades apresentadas, pois suas peças necessitam de níveis elevados de confiabilidade. Este fato foi um dos grandes motivadores do surgimento de novas frentes de pesquisas e, entre elas, o

nascimento de uma nova linha conhecida como Integridade Superficial; estas relacionadas a possíveis explicações para ocorrências de falhas prematuras em componentes aeronáuticos (BECKER *et al*, 2005).

O termo “integridade superficial” foi citado pela primeira vez por Field e Kahles em meados da década de 60, utilizado para definir o conjunto de alterações na superfície das peças e em camada logo abaixo dela (subsuperfície), por causa da ação de ferramentas de corte ou de outros processos de fabricação. As alterações podem ser de natureza mecânica, metalúrgica, química ou outros tipos de transformação. Mais tarde, em 1971, tornou-se campo oficial de estudo durante a 21ª Assembléia Geral do CIRP (*International Conference on Reserh of Production*) (BECKER *et al*, 2005).

Dentro deste contexto percebe-se que durante a confecção de peças pelos processos de usinagem, a qualidade superficial se torna um dos maiores quesitos apontados para se obter respostas relacionadas às suas respectivas conformidades (OZEL; KARPT, 2004).

Em boa parte das empresas esta inspeção se limita única e exclusivamente à análise de rugosidade superficial ou características dimensionais da peça, fato que nem sempre retrata as reais condições da integridade superficial das peças (superfície e subsuperfície).

O bom controle da integridade superficial busca descrever e monitorar as possíveis alterações produzidas na camada superficial e sub-superficial das peças ao longo da confecção das mesmas, incluindo os seus efeitos (microestrutura, mudança de fases dentre outras) sobre as propriedades do material e o comportamento da superfície em serviço.

De maneira conjunta com a precisão de forma e de localização, a integridade superficial, de modo decisivo, determina ou exerce certo controle no comportamento das peças em trabalho, como por exemplo, o surgimento e a propagação de trincas (DAMASCENO, 1993).

A ocorrência de mudanças na integridade superficial da peça pode levar a aceleração do processo de fadiga, alterar a resistência à abrasão e à corrosão, ou ainda provocar o surgimento e/ou propagação de trincas (VIEIRA., *et al*, 1998).

Este rompimento de integridade superficial promove comportamentos adversos nas peças submetidas aos processos usinagem, dos quais se pode citar o surgimento de fenômenos que podem levar a um aumento da durabilidade de alguns componentes, devido à presença de resíduos de tensões do tipo compressivas, geradas no interior da peça usinada e que leva a um incremento da resistência à fadiga e mecânica (estática). Além de tensões residuais de compressão, as peças submetidas ao processo de usinagem também podem apresentar tensões de tração que, por sua vez, exercem sobre a peça usinada um papel indesejável na redução da resistência mecânica das peças, pois ela acelera o processo de propagação de trincas dentre outras coisas; junto ao processo de retenção de tensões, os componentes usinados estão expostos a formação de camadas de martensita revenidas e não revenidas (LIMA, 2002).

Desta forma o comprometimento da integridade superficial das peças usinadas pode ser detectado pelas alterações de superfície, que são resultantes das solicitações dos processos de usinagem utilizados para a sua obtenção (COSTA *apud* DAMASCENO, 1993). Esta detecção ameniza os riscos de expedição de peças com possíveis alterações de integridade superficiais.

A necessidade deste trabalho se justifica por diversos fatores, dentre os quais podem ser citados:

- ✓ a ocorrência de falhas nas peças durante o uso;
- ✓ a falta de conhecimento sobre a efetiva causa destas falhas;
- ✓ o pouco conhecimento sobre a influência que cada parâmetro de usinagem exerce sobre a integridade superficial de peças usinadas.

1.1. PROBLEMA DA PESQUISA

Os parâmetros de corte em processos de usinagem proporcionam alterações à integridade das peças usinadas?

Quanto que cada parâmetro de usinagem é responsável pelas alterações na integridade superficial das peças?

1.2. HIPÓTESE

O trabalho deixa como possíveis hipóteses:

- a) os processos de usinagem provocam alterações na integridade superficial das peças;
- b) as alterações na integridade chegam a ser tão significativas que podem induzir a ocorrência de falhas no uso das peças em campo;
- c) existem parâmetros de usinagem que podem apresentar maior ou menor influência sobre as alterações da integridade.

1.3. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo identificar quais parâmetros de usinagem, dentre os adotados nos ensaios desenvolvidos nesta pesquisa,

promovem maiores alterações à integridade superficial de peças usinadas, nos principais processos de usinagem (torneamento, fresamento, furação e retificação).

1.3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para facilitar e melhor compreender as etapas a serem concluídas para se atingir o objetivo central do presente trabalho seguem a seguir os objetivos específicos:

a) desenvolver ensaios de usinagem variando alguns parâmetros de corte (V_c , a_p , f_n , f_z , D/P, com fluído de corte e sem fluído de corte) promovendo condições diferentes ao cenário de estudo;

b) promover análises detalhadas (análise da CAC, análise metalográfica, análise de microdureza, análise de dureza superficial, análise de tensão residual e análise da rugosidade superficial) nos corpos de prova, visando à identificação de possíveis ocorrência de fenômenos ligados à integridade superficial e subsuperficial dos corpos de prova analisados;

c) identificar dentre as variáveis independentes de entradas, qual a que mais se destaca negativamente quanto aos danos à integridade superficial e subsuperficial do material.

1.4. RELEVÂNCIA

A grande relevância deste trabalho encontra-se na existência de uma preocupação global com a qualidade dos produtos e componentes confeccionados através de processos de usinagem.

Trará subsídios aos profissionais da área de usinagem, tanto os ligados à área acadêmica como os da área industrial, sobre como extrair o máximo dos processos, sem comprometer a qualidade dos produtos obtidos por meio de processos de usinagem. Dessa forma, estarão disponíveis informações pertinentes ao controle da integridade superficial, dos principais processos de usinagens utilizados.

1.5. METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia adotada para a construção deste trabalho baseou-se numa abordagem de cunho explicativo, com procedimentos de pesquisa bibliográfica e pesquisa experimental (GIL, 2002). O início da elaboração do trabalho foi marcado por um levantamento de dados bibliográficos, em publicações relacionadas ao contexto do assunto; num segundo momento deu-se o início da pesquisa experimental que foi marcada por estágios, os quais serão mais bem detalhados ao longo do texto.

A busca pela bibliografia pesquisada foi marcada por um paralelo entre a localização das informações que dessem subsídios suficientes à formação e ao aprimoramento dos conceitos relacionados ao fenômeno estudado (integridade superficial) e a confirmação sobre a não existência de trabalhos com pesquisas voltadas ao mesmo propósito, ponto de grande importância e que comprovaria o ineditismo do trabalho.

Para tanto, foram desenvolvidas pesquisas em bases de dados e em *sites* mais cotados de buscas na *internet*. Para o acesso as bases de dados o caminho utilizado foi o Portal Brasileiro de Informação Científica da CAPES, endereço que

reúne as principais fontes e bases de dados científicas mundiais, bem como os *sites* de busca Google Acadêmico, Google, Altavista e Yahoo Cadê. Páginas de busca, como o caso do Google apresenta em seus resultados de pesquisa periódicos de bases de dados, associados ao tema desejado, sendo um grande facilitador do processo de busca nas bases de dados quanto se tem o acesso livre aos portais, como é caso dos pontos de acessos localizados da universidade em questão.

Como palavras-chave das buscas foram utilizados termos específicos ao objeto de estudo (integridade superficial de peças usinadas) e termos que direta (tensão residual, temperatura de usinagem, integridade superficial, integridade sub-superficial, rugosidade superficial, processo de usinagem dentre outros) e indiretamente (otimização de usinagem, tecnologia de superfície, análise de falhas, dentre outras) tangenciam o assunto estudado.

Para melhor compreensão a respeito do desenvolvimento da pesquisa experimental deste trabalho, se detalha ao longo do texto, o procedimento experimental adotado.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

Com base no desenvolvimento desta pesquisa, o presente trabalho encontra-se estruturado conforme segue:

No capítulo I se desenvolve a apresentação da introdução do trabalho, a qual contextualiza tópicos referentes ao tema da pesquisa; nesta primeira parte apresenta-se também o problema da pesquisa, as hipóteses, as justificativas, os objetivos a serem atingidos, a relevâncias e a metodologia adotada.

No capítulo II apresenta-se o referencial teórico do trabalho, visando a construção do estado da arte sobre Integridade Superficial, tema central da pesquisa e de alguns assuntos que tangenciam este tema e que são importantes para serem mais bem explorados, como, por exemplo, o tópico relacionado à análise de integridade de superfícies.

O capítulo III apresenta um levantamento desenvolvido no sentido de identificar entre os parâmetros, qual ou quais parâmetros influenciam mais no comportamento de integridade superficial de peças usinadas.

O capítulo IV aborda os Materiais e Métodos da pesquisa, no qual são relacionados os equipamentos, ferramentas, máquinas-ferramentas utilizados.

O Capítulo V apresenta os resultados das análises desenvolvidas.

No Capítulo VI tece-se a conclusão do trabalho.

No capítulo VII apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

2. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A integridade superficial, tida como medida de qualidade das superfícies usinadas pode ser controlada em função de elementos e fenômenos que descrevem e retratam as condições da superfície e subsuperfície do material das peças submetidas ao processo de usinagem. Geralmente são apresentadas na forma de alterações ocorridas nas propriedades metalúrgicas, químicas, topológicas das superfícies, como condições da rugosidade superficial, variações no comportamento de dureza, alterações microestruturais e resíduos de tensões (BORDINASSI, 2006).

O comprometimento da integridade superficial das peças pode ser associado a alguns dos tipos de alterações de superfícies, diretamente ligados a fenômenos conseqüentes ao processo de usinagem, entre elas se pode citar: (LIMA, 2002)

- ✓ alterações de superfície e subsuperfície provoca pelas condições de usinagem (CAC – Camada Afetada pelo Calor);
- ✓ alterações no arranjo físico da microestrutura dos materiais;
- ✓ alterações no comportamento da dureza superficial;
- ✓ alterações nas medidas de Microdureza;
- ✓ rugosidade superficial;
- ✓ alterações no estado de tensão das peças, surgimento de Tensões residuais, nas áreas próximas a região usinada.

Dessas alterações as duas primeiras podem ser constatadas num mesmo momento, realizando simultaneamente duas análises com abordagens diferentes.

Para melhor compreensão de cada uma destas possíveis alterações, são apresentadas e discutidas características e particularidades de cada uma destas

alterações, assim como uma rápida passagem nas formas existentes de detecção e mensuração de tais alterações.

2.1. CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC) E ALTERAÇÃO MICROESTRUTURAL

Camada Afetada pelo Calor (CAC), também conhecida e citada por outros autores como Heat-Affected Zones (HAZ) (SHAW, 1994 pp 279-282) e Wite Layer (camada branca) (ABRÃO & ASPINWALL, 1996) dentre outros é o dano provocado na superfície e subsuperfície de peças metálicas submetidas a esforços mecânicos e/ou térmicos, comuns em processos de fabricação por usinagem, em que tais solicitações fazem parte integrante do processo (MALKIN, 1989; LIMA, 2002).

Esta camada pode ser identificada na superfície e/ou subsuperfície das peças que sofreram no processo de usinagem exposição a altas temperaturas geradas no momento do contato entre ferramenta/peça que, em boa parte dos casos, podem promover alterações de fases no material das peças em questão. Estas alterações microestruturais podem ser percebidas pela própria coloração e estrutura apresentadas pela peça analisada microscopicamente, ou pelo arranjo físico desta durante a mesma análise, como pode ser observado na Figura 1; nesta figura pode-se identificar a presença da CAC gerada numa amostra submetida a ensaio de processos de furação otimizado.

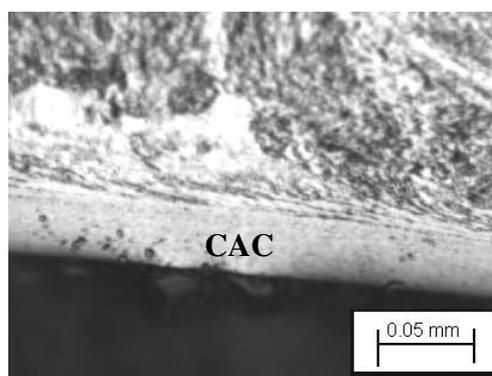


FIGURA 1: CAC EM AÇO ABNT 4340 PROCESSO DE FURAÇÃO.
Fonte: Lima (2002)

A análise da CAC, também denominada como *HAZ* – (*Heat affect zone*), por outros autores, principalmente de outras áreas de concentração, vem ganhando espaço no cenário da usinagem. Bastante conhecida nos processos de fabricação ligados ao processo de soldagem e corte por meio de descargas elétricas, a CAC vem se mostrando muito útil e eficaz como uma ferramenta de averiguação da qualidade de peças dentro de uma concepção voltada para micro determinante de qualidade (VIEIRA. *et al*, 1998).

Em processos de usinagem, boa parte da energia mecânica envolvida é transformada em energia térmica, ou seja, calor; é usual falar-se em "calor gerado no processo" para se referir a essa transformação de energia. Esse calor tem três possíveis fontes, segundo Degarmo (1997):

- ✓ A formação do cavaco, propriamente dita, em um processo no qual as principais fontes de energia térmicas são as deformações elásticas e plásticas do material, e o cisalhamento do material da peça;
- ✓ O atrito entre ferramenta e peça;
- ✓ O atrito entre o cavaco e ferramenta.

A dissipação do calor gerado na região de corte, pode se dar através da ferramenta, da peça, do cavaco, do fluido de corte e do ar. As duas primeiras formas são indesejáveis por acelerarem o processo de desgaste da ferramenta (redução da vida) e por poderem promover a formação da CAC nas peças usinadas (transformação de fase), pois a temperatura na região de formação de cavaco podem atingir temperaturas próximo dos 1000°C, promovendo condições propícias a ocorrência da transformação de fases (SNOEYS *apud* ABRÃO, 1991).

Com a elevação da temperatura e o posterior resfriamento na peça (injeção de lubri-refrigeração) cria-se um cenário similar ao de tratamento térmico de têmpera

o que pode acabar resultando, no surgimento de camadas de martensita pura (α'), destacando a existência deste fenômeno sem o menor controle das variáveis.

Segundo Shaw (1994), apesar de não haver um longo tempo de exposição às temperaturas elevadas, como ocorre nos tratamentos térmicos, as mudanças de fases ocorrem devido às deformações plásticas a que o material é submetido, em um mesmo momento em que ocorre o aumento de temperatura, durante a formação do cavaco.

Essas deformações, aliadas ao aquecimento, promovem uma mudança coordenada dos átomos em um curto espaço de tempo, que resulta na formação de uma camada termicamente afetada (CAC).

Para melhor entender a formação da CAC, é interessante observar na *Figura 2*, onde está bem ilustrado o que ocorre com a estrutura do material em determinadas regiões da superfície da peça em direção a seu centro. Percebe-se que, abaixo do contato do conjunto ferramenta/peça/cavaco, ocorre a formação de três diferentes fenômenos (A, B e C), estes fenômenos são gerados em diferentes estágios, ao longo do perfil de propagação térmica apresentado pelo conjunto.

No estágio A, a peça é submetida a influências geradas por esforços, tanto de origem térmica quanto de origem mecânica, o que pode propiciar alterações nesta região afetada (A – superfície e proximidades); alterações como mudanças de fase no estado do material, reorientação de sua microestrutura e deformações mecânicas de tração e compressão.

No estágio B a peça deixa de sofrer solicitações térmicas, devido a distância do ponto de contato, passando a ser solicitada apenas mecanicamente, podendo gerar na região afetada B deformações, esmagamentos e rearranjo físico do material da peça. Já a região C seria encarada como a região onde o processo de usinagem,

deixa de promover alterações no comportamento das peças, pois esta região é utilizada em algumas análises como referência entre região não alterada (núcleo), ou como representação do estado inicial da peça.

As distâncias formadas entre uma região e outra variam conforme o processo de usinagem utilizado e os parâmetros de corte adotados, podendo atingir profundidades das mais variadas em resposta a tais combinações.

Esta distância está diretamente relacionada com o calor gerado nesta região, podendo, em boa parte dos casos, atingirem patamares de temperatura, iguais ou superiores à temperatura de austenitização do aço, fato que condiciona a estrutura do material da peça a condições propícias para mudança de fase, passando a depender somente da severidade com que ocorrerá o resfriamento desta região e tudo isto em um curto espaço de tempo.

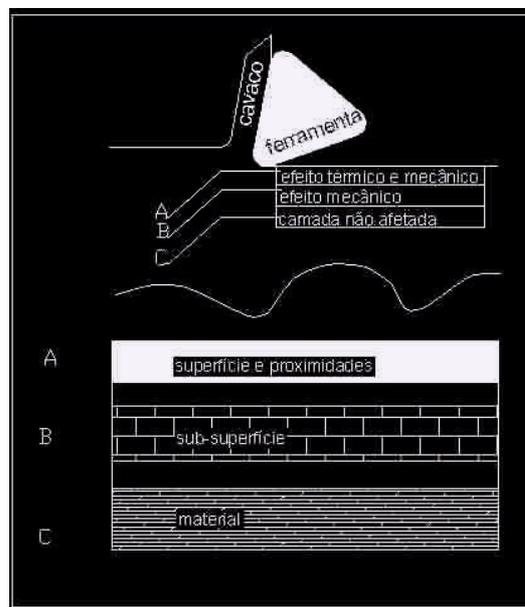


FIGURA 2: REGIÕES DE SOLICITAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM
Fonte: Lima, (2002)

Neste tempo relativamente pequeno, em que uma pequena parcela da peça (superfície) fica exposta a temperatura de austenitização é justamente o que acaba gerando ao longo do material da peça o gradiente de calor, no qual se pode

identificar na mesma peça, diferentes características mecânicas, físicas e microestruturais; este fenômeno pode ser agravado com a questão da utilização ou não de fluido de corte, como pode ser identificado na Figura 3.

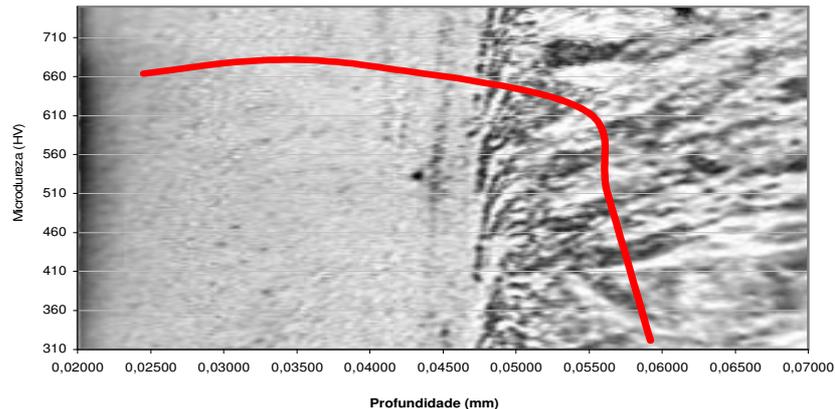


FIGURA 3: ANÁLISE DUPLA DA CAC (MICRODUREZA E MICROESTRUTURA)

FONTE: LIMA (2002)

Em alguns processos de usinagem se vêm adotando a formação da CAC como parâmetros de análise de danos à camada superficial, como se pode ver em algumas pesquisas desenvolvidas por Shaw (1994), Spur; Tio (1991), Lima *et al* (2001), Lima; VIEIRA (2002), Alvarez (2006), que utilizaram esta análise voltada para alguns processos de usinagem.

Esta análise é desenvolvida através de imagens captadas de amostras de materiais removidos da peça usinada. Para tanto, é utilizado um microscópio metalográfico o qual promove um aumento necessário da microestrutura a ser analisada. Este microscópio pode ser substituído por um microscópio eletrônico de varredura (MEV) o que proporcionaria, para a análise, maior precisão nas respostas, principalmente em situações de ocorrência de aderência de outros materiais na superfície analisada.

Num segundo momento desta análise ocorre a fase de interpretação dos fenômenos captados pela imagem, esta fase depende de *softwares* analisadores de imagens, pelos quais os fenômenos ocorridos nas superfícies e subsuperfícies das peças são identificados e qualificados conforme suas características. São identificadas mudanças de fases do metal, alterações micro-estruturais, deformações mecânicas e/ou transformações térmicas.

Esta análise promove um ensaio do tipo destrutivo nas peças, mas sinaliza claramente, por meio de imagem, quando existe a ocorrência de alterações na integridade superficial da peça usinada.

Na FIGURA 4, é apresentado o rompimento da integridade superficial proporcionado por uma operação de usinagem (processo de furação) onde pode ser observado, de forma bem evidenciada, o surgimento de uma camada de martensita não revenida, proveniente das condições propícias (altas temperaturas e resfriamento) geradas durante o processo de usinagem.

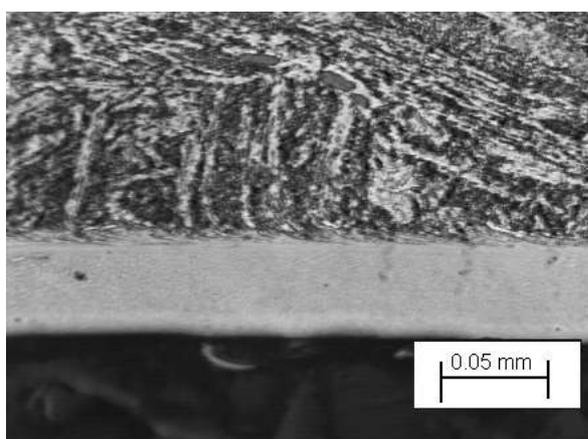


FIGURA 4: ANÁLISE DE IMAGEM

FONTE: LIMA (2002)

O *software* analisador de imagem sinaliza algumas características pertinentes às alterações promovidas na integridade das peças, pelo processo de usinagem, as quais podem ser traduzidas por meio da contagem da granulometria da

microestrutura do material, reorientação dos grãos do material, muito comum na região de interface camada afetada x núcleo do material. Pode-se, também, identificar a propagação interna do calor na superfície analisada pela profundidade da camada, dentre outras características que referenciam a ocorrência do rompimento da integridade superficial.

2.2. MICRODUREZA E DUREZA SUPERFICIAL

Os valores de dureza são largamente utilizados nas especificações de os materiais, durante estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas e na comparação de diversos materiais. Entretanto, o conceito físico de dureza não tem um mesmo significado para todas as áreas que tratam desta propriedade. Essa conceituação divergente depende da experiência e do ramo de atuação de cada área ao estudar o assunto (DIETER, 1976), exemplo:

- ✓ Para área metalúrgica dureza significa resistência à deformação plástica permanente;
- ✓ Para a engenharia mecânica define-se dureza como a resistência à penetração de um material mais duro em outro;
- ✓ Para área de usinagem a dureza fornece uma medida de resistência ao corte do metal. (VIEIRA, 1996).

Desta forma o ensaio utilizado, para definir esta importa propriedade que é o ensaio de dureza que dependendo da aplicação e da área em questão deve-se definir a maneira pela qual o ensaio deve ser conduzido sempre seguindo orientações contidas em normas técnicas (SOUZA, 1982). Para o cenário deste trabalho o ensaio indicado é por penetração (microdureza *Vickers*).

O princípio de medição pelo método *Vickers* consiste no seguinte: o penetrador é uma ponta de diamante, na forma de uma pirâmide de base quadrada, com um ângulo de 136° entre as faces opostas, sobre o qual é aplicada a carga para a medição.

Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente livre de deformações, e como todas as impressões são semelhantes entre si, variando apenas nas proporções dimensionais das suas diagonais, o método *Vickers* (HV) é independente da carga, ou seja, o valor de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos.

Para esse método de medição de dureza a carga varia entre 1,00 Kgf a 120,00 Kgf para a dureza *Vickers* convencional e entre 0,01Kgf a 1,00Kgf para análise de microdureza, segundo a norma ASTM E384-99. A mudança da carga é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação elástica do material, e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no visor da máquina. A forma da impressão é um losango regular como mostra a Figura 5.

Com a utilização de uma fórmula matemática pode-se calcular a dureza, através da medição das diagonais do losango, impresso na região a ser medida, obtendo, assim, a área da superfície identificada; e ao se dividir o valor da carga aplicada por essa área tem-se a leitura da dureza *Vickers* dada em Kgf/mm^2 (SOUZA, 1982).

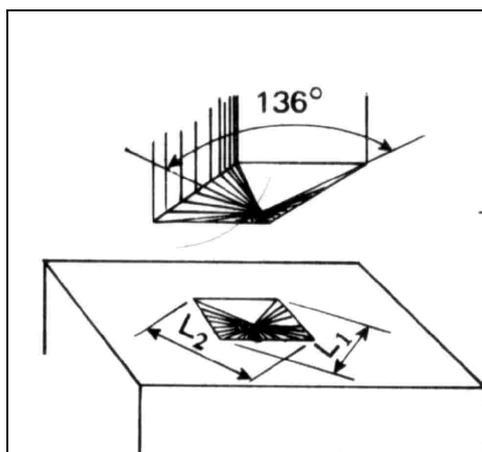


FIGURA 5: PENETRADOR E IMPRESSÃO VICKERS

Fonte: Souza (1982)

A área da impressão deve ser medida com muita precisão, através de microscópio metalográfico acoplado à máquina fotográfica digital, para a determinação das diagonais com grande precisão (cerca de 1 μm). A pré-carga é aplicada levemente na superfície plana da amostra, por meio de um pistão e é mantida durante cerca de 10 segundos, a carga total é aplicada por mais 15 segundos; com tolerância de 2 segundos (ASTM E384-99).

As principais vantagens do método *Vickers* são, segundo Marin (*apud* SOUZA, 1982):

- ✓ Escala contínua;
- ✓ Impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça, se comparadas com método *Brinell*;
- ✓ Grande precisão de medida;
- ✓ Deformação nula do penetrador;
- ✓ Existência de apenas uma escala de dureza;
- ✓ Aplicação para toda gama de dureza encontradas nos diversos materiais;
- ✓ Aplicação em qualquer espessura de material, o que permite a medição de durezas superficiais.

A dureza *Vickers* é muito utilizada para pesquisas, estudos e, mais especificamente, para determinação de profundidade de camadas de proteção superficial, profundidade de descarbonetação nos aços (SOUZA, 1982); daí a adoção deste método para a realização das análises das Camadas Afetadas pelo Calor (CAC), pois muitas das aplicações da dureza *Vickers* são voltadas para o ensaio de microdureza tendo em vista o fato de produzir uma impressão microscópica no material, proporcionada por cargas inferiores a 1kg (DEGARMO, 1979; SOUZA, 1982).

Boa parte das aplicações do ensaio de dureza *Vickers* está voltada para aplicações de ensaios em microdureza, ou seja, análises realizadas com cargas sempre inferiores a 1Kgf. Este tipo de ensaio é muito importante, pois: auxilia na determinação de profundidade de camadas cementadas, camadas obtidas por tempera superficial; ajuda na identificação de mudanças de fase, identificação de alterações provocadas pelo processo de manufatura; possibilita traçar o gradiente de calor de amostras expostas a altas temperaturas (temperatura de austenitização) para peças metálicas, identificação de inclusões e/ou microconstituintes, dentre outras análise que podem ser feitas pelo uso da análise da microdureza.

2.3. TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são tensões internas que se desenvolvem em componentes que apresentam um estado de equilíbrio macroscópico no material. Pontos de concentração de tensões residuais ocorrem no material, mesmo sem a existência de carregamentos externos, gradientes de temperatura, forças de corpo ou influência da gravidade.

Muitas das falhas ocorridas em peças e componentes em campo podem ser resultantes da superposição das tensões resultantes das cargas aplicadas com as tensões residuais encontradas na peça (SUTERIO, 2005).

A exata previsão ou definição das tensões residuais passa a ser algo pouco provável de ocorrer, devido ao grau de detalhamento de dados pertinentes à história do material da peça, desde o processo de fabricação da matéria-prima até a fabricação do produto final, e seu uso em campo. A maneira mais utilizada para a determinação do nível de tensões residuais existentes num material é através de inspeções realizadas diretamente na estrutura destas (SUTERIO, 2005).

Tensões residuais são as tensões que se mantêm na peça mesmo após todas as solicitações externas serem totalmente retiradas. Estas tensões freqüentemente ocorrem em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos e/ou mecânicos.

No fenômeno de ocorrência da tensão residual pode-se originar tensões residuais tanto de compressão como de tração o que acaba determinando os rumos da vida das peças em uso, aumentando ou diminuindo sua resistência a solicitações como, por exemplo, a resistência à fadiga (MONICI, 2003).

As operações de manufatura são os principais processos geradores de tensões residuais em vários graus, por exemplo, fundição, laminação, estampagem, Usinagem, tratamentos térmicos e termos-químico, soldagem, trefilação e dobramento, dentre outras. Em alguns casos as tensões residuais podem ser introduzidas mais tarde na vida do material, durante procedimentos de instalação, montagem, eventuais sobrecargas, ou ainda, por reparos e modificações em serviço.

Estas tensões residuais aparecem nos materiais durante as diferentes etapas do processamento, como, por exemplo, quando o material passa por processos de

usinagem e quando submetido a processos de tratamento térmico, os quais são reconhecidos por melhorarem as propriedades mecânicas de peças de aço (OGATA, 2003). Deve-se ainda observar que estas propriedades mecânicas estão primeiramente associadas a fatores ligados ao material, tais como composição química e microestrutura, além dos fatores ligados ao processo de fabricação, nos quais se incluem o tratamento térmico (OGATA, 2003).

Os processos de usinagem são cenários propícios ao surgimento de tensões residuais nas regiões das peças direta ou indiretamente ligadas ao ponto de contato ferramenta/peça (superfície e subsuperfície) o que pode comprometer as características de resistência mecânica da peça em serviço (FUSSE, 2005).

Nos processos de usinagem, uma grande parcela das tensões residuais geradas na peça é de tração, o que mostra um forte indício de que as mesmas têm, na grande maioria, origem térmica. As tensões residuais de compressão, quando ocorridas, podem ser consideradas benéficas a algumas propriedades mecânicas da peça enquanto as tensões residuais de tração proporcionam às peças prejuízos de ordem mecânica, a corrosão e ao desgaste (FUSSE, 2005).

Ainda dentro do processo de usinagem existe a exposição do material a patamares elevados de temperatura; em determinadas situações temperaturas de austenitização, que vem proporcionar transformação de fases que também são geradoras de tensões residuais, pois tais transformações são acompanhadas de mudanças no volume específico do material, fazendo com que o material aquecido dentro da zona termicamente afetada se expanda e colida com o material mais frio isento de transformação (RODEIRO, 2002).

As análises de tensões evidenciam que a falha do componente está geralmente relacionada com defeitos de superfícies que surgem já no estágio de

manufatura (laminação, conformação, sinterização, etc) ou como resultado de um processo subsequente dentro da própria confecção do produto em operações de usinagem. Dependendo do processo de manufatura aplicado e da direção da usinagem em relação à direção da carga aplicada, pode gerar diferenças significativas nas resistências dos componentes analisados (SPUR; TIO, 1991).

O Quadro 1 expõe, de forma resumida, a apresentação destas tensões residuais e os respectivos agentes estimuladores ou causadores de tais tensões.

(1)	Deformação plástica local	Compreende todos os processos de carregamento mecânico e usinagem
(2)	Fornecimento ou Retirada de calor + (1)	Soldagem, fundição, processos de tratamento térmico
(3)	Diferente expansão térmica de diferentes fases + (2)	Processos de recobrimento
(4)	Gradientes de composição química + (2)	Tratamentos de superfície (cimentação, nitretação) e recobrimento

QUADRO 1: ORIGENS DE TENSÕES RESIDUAIS

Fonte: Campos *et al* (2006)

Nota-se nos últimos anos, em termos de usinagem, um grande interesse em descobrir meios que proporcionem uma otimização do processo produtivo. Em função disso, é preciso criar situações que favoreçam o desempenho da trilogia produto, fabricação e uso. Portanto, é necessário que se faça uso de equipamentos, materiais e ferramentais adequados, visando melhores qualidades da integridade superficial da peça usinada (DAMASCENO, 1993).

A tensão residual superficial tem uma importância fundamental no comportamento das resistências à fadiga dos materiais, ou seja, quando as tensões

são do tipo compressivas, são benéficas, melhoram a resistência à fadiga do material já quanto trativas dependendo da sua magnitude podem ser malélicas a resistência do material (MONICI, 2003; DAMASCENO, 1993; VIEIRA. *et al*, 1998).

Durante a formação do cavaco no momento da usinagem, ocorre a produção de altas sollicitação mecânicas, induzindo o material da peça a um estado de tensão residual na superfície e subsuperfície da peça. Um aumento no avanço eleva a tensão residual superficial que pode ser um decréscimo da tensão que já era de compressão ou aumentá-la no caso de ser tração (SPUR; TIO, 1991; DAMASCENO, 1993).

A medição das tensões residuais vem passando por um processo de evolução, marcado pela mudança de conceito que, até então, era a realidade dos ensaios direcionados para detecção da existência ou não de tensões residuais no interior de peças e/ou em suas superfícies.

Inicialmente, as medições eram feitas por técnicas exclusivamente destrutivas e, muitas vezes, com a introdução de novas tensões durante o ensaio. Porém, as técnicas de medição vêm sendo aperfeiçoadas e o conceito de incerteza da medição está cada vez mais presente e gerando muitas discussões sobre o assunto.

Existem várias técnicas para medição de tensões residuais que podem ser classificadas em métodos semi-destrutivos, destrutivos, e não-destrutivos. Os métodos semi-destrutivos e destrutivos se baseiam na alteração do estado de equilíbrio das tensões residuais, provocando alívio destas tensões no ponto ou na região de medição.

As deformações causadas pelo alívio são medidas e, através de modelos matemáticos adequados, são determinadas as tensões residuais. Nestes dois métodos somente são analisadas as tensões residuais macroscópicas. Os métodos

não-destrutivos são baseados nas variações de parâmetros físicos ou cristalográficos do material em análise, relacionados com as tensões residuais que provocam estas alterações.

Os principais métodos de medição da tensão residual podem ser divididos conforme segue:

- ✓ Semi-destrutivos: **método do furo cego** é uma das técnicas mais utilizadas na medição de tensões residuais, por ser de fácil aplicação na maior parte dos casos, ter uma boa relação custo-exatidão, e por ter seus procedimentos de medição e tratamento de resultados normalizados e ainda o dano causado por sua execução é muito localizado, o que na maioria dos casos não compromete funcionamento do equipamento analisado, este método consiste na execução de um furo não passante na superfície da peça a ser analisada conforme norma técnica ASTM-E-837. Esta medição pode ser associada a técnicas experimentais para determinação das redistribuições de tensões por ele causadas. (PUC-RIO, 2008)
- ✓ Destrutivos:
 1. **Remoção de Camadas** – este método consiste nas medições das deflexões apresentadas pelo material da superfície da peça analisada, após sucessivas remoções de camadas deste material. Esta técnica baseia-se no princípio de que a deflexão varia após a retirada de uma camada de material tensionado, esta remoção de camada é feita normalmente por usinagem química, visando provocar a menor influência possível no estado do material. Esta variação do estado tensão, pós remoção da camada, ocorre porque o material busca uma

nova posição de equilíbrio estático para os esforços internos gerados pelas tensões atuantes no interior da peça analisada.

2. Método do Seccionamento – as técnicas utilizadas no método de seccionamento têm como princípio a criação de superfícies livres, para promover a redistribuição das tensões residuais existentes na região seccionada da peça e então possibilitar sua posterior identificação. Algumas técnicas de seccionamento foram desenvolvidas exclusivamente para avaliar peças cilíndricas e anelares. Através de cortes radiais em anéis (que podem ser partes de tubos), pode-se determinar visualmente se ali estão contidas tensões residuais circunferenciais compressivas ou trativas, dependendo da ocorrência do fechamento ou abertura do anel.

✓ Não-destrutivos:

1. Difração de Raio X – Este método traz como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-x. Esta grandeza é medida através da posição angular da linha de difração. Num material policristalino, com granulometria fina e isento de tensões, o espaço entre os planos cristalinos não varia com a orientação destes planos. Portanto, se o ângulo de difração para um material livre de tensões for conhecido, pode-se calcular a deformação da rede cristalina da peça em análise, este método é baseado na Lei de Bragg. Este método apresenta algumas limitações que estão intimamente atreladas a parâmetros metalúrgicos como as impurezas e vazios que são muitas vezes impossíveis de serem detectados para que correções possam ser

feitas, e com relação ao tamanho de grão, é de grande importância para a confiabilidade dos resultados que o material analisado tenha uma granulometria refinada, comportamento linear elástico, seja homogêneo e isotrópico, e não possua gradientes de tensão na região analisada. Outros fatores limitantes para o emprego do método são: alto custo de seus equipamentos e a periculosidade devida à radiação atrelada ao processo. (PUC-RIO, 2008)

2. Difração de Nêutrons – O método de medição de tensões por difração de raios nêutrons segue o mesmo princípio do método de difração de raios-X. Este método se baseia na variação das distâncias entre planos medidas com as tensões atuantes na peça analisada. A capacidade de penetração dos raios nêutrons é maior do que a dos raios-X, o que permite neste caso análise de porções maiores. (PUC-RIO, 2008)

3. Método Ultrassônico – as técnicas de medição de tensões com ultra-som baseiam-se no fato de que a velocidade de propagação das ondas ultra-sônicas varia aproximadamente de forma linear com o nível de tensões da peça analisada. Este método pode ser realizado de algumas maneiras, mas as mais conhecidas desta técnica são: a medição direta da variação da velocidade de propagação da onda e a medição explorando o efeito da birrefringência acústica também conhecida por acustoelasticidade. (PUC-RIO, 2008)

4. Método Magnético (efeito Barkhausen) – este método pode ser aplicado apenas em materiais ferromagnéticos. A aplicação de um campo magnético ou de tensões mecânicas provoca um rearranjo na

orientação magnética no material. Este rearranjo acontece de forma que, à medida que o material assume uma magnetização, as regiões se unem formando áreas maiores de mesma orientação magnética. Este crescimento da área igualmente orientada magneticamente ocorre de forma incremental e rápida, gerando o que é conhecido por “Ruído de Barkhausen”. A técnica tem como princípio a medição da amplitude desses ruídos. A medição de tensões residuais com este método é baseada em curvas de calibração obtidas através da aplicação de tensões conhecidas em espécimes, que não precisam necessariamente estar livres de tensões, contanto, que o seu limite elástico do material não seja excedido, o que impossibilitaria a separação entre as tensões aplicadas e as pré-existentes. (PUC-RIO, 2008)

2.4. RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade superficial, também conhecida como textura primária, ou seja, parte mais externa de peças ou componentes, é constituída por marcas deixadas nestas superfícies provenientes do perfil de ferramentas utilizadas nos processos de confecção destas (NOVASKI, 1994).

O tipo e o acabamento do perfil superficial, encontrados ou desejados nas peças confeccionadas estão diretamente ligados ao processo de usinagem empregado em sua obtenção, como já sinalizava Mateos (1974). Esta afirmação pode ser mais bem trabalhada no sentido de que com a evolução tecnológica pode-se, através do uso de ferramentas diferenciadas e parâmetros de cortes bem dimensionados, alcançar diferentes resultados com os processos de usinagem.

Após algumas décadas de estudo chega-se a uma maior complexidade dos fatos em que as condições do perfil superficial das peças usinadas passam, então, a ser o resultado de um complexo processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e, às vezes, reações químicas (MACHADO; SILVA, 2000). Dessa forma, tem-se como acabamento superficial uma combinação entre alguns fatores apresentados na superfície a ser analisada (ondulação, rugosidade e falhas) (LOPES *et al*, 2006).

A maior parte da rugosidade em uma superfície usinada é resultante da combinação de alguns fatores que ocorrem ao longo do processo de corte; dentre elas destacam-se fatores como as condições de corte, geometria da ferramenta, geometria da peça, rigidez da máquina ferramenta, material da peça e material da ferramenta (SANTIN; PANOSSO, 2003).

A natureza da superfície final obtida é conseqüência direta do processo de usinagem a que foi submetida, podendo ser este o responsável por alterações que afetam as propriedades do material, conforme Gaspar *et al* (2004), “existem muitos fatores, associados às condições de usinagem, que influenciam a textura da superfície em operações de acabamento”. Dentre estes fatores, destacam-se o tipo e a geometria da ferramenta de corte utilizada.

A correta utilização dos parâmetros de corte é outro fator que influencia na formação da textura de superfície; as variações na profundidade de corte, durante as operações de usinagem, apresentam pequenas influências nas características das superfícies, já a utilização de pequenos valores de avanço promovem melhorias significativas na qualidade superficial das peças, que podem ser estimadas por meio de equações teóricas (SANTIN; PANOSSO, 2003).

2.5. ANÁLISE DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Dentro do processo de detecção das condições relacionadas à integridade superficial de peças submetidas ao processo de usinagem, é necessário uma triagem detalhada na superfície e subsuperfície destas peças.

Esta análise deve ser realizada em etapas com o objetivo de detecção de características distintas, relacionadas ao comportamento estrutural e microestrutural das peças; tal análise assume características de ensaios dos tipos destrutivos e não destrutivos dando maior ênfase, num primeiro momento, aos do tipo destrutivos.

Dentre os ensaios que podem ajudar na detecção da integridade superficial das peças estão:

1. Análise metalográfica (CAC e microestrutura);
2. Análise de microdureza;
3. Análise de dureza superficial;
4. Análise de rugosidade superficial;
5. Análise de tensão residual.

2.6. PROBLEMAS DECORRENTES DA QUEBRA DA INTEGRIDADE SUPERFICIAL

Dentre os vários possíveis problemas, como elemento chave pode-se citar a promoção de um rearranjo microestrutural na estrutura de um material sem nenhum controle específico das condições de alterações, e o fato de na grande maioria das vezes o produtor e o usuário nem se quer, ter o conhecimento desta reestruturação ocorrida no interior do material de suas peças e/ou componentes.

Com base no cenário apresentado cria-se o grande problema (risco), pois os futuros usuários dos produtos irão submetê-los a solicitações dimensionadas a um

determinado material que, supostamente, encontra-se em uma determinada fase física (ferrita, perlita, martensita dentre outras), podendo esta solicitação ser inadequada ao real material utilizado, propiciando, desta forma, uma potencial situação de risco.

Outros problemas podem igualmente ser citados, como: a ocorrência de falhas em pistas de rolamentos ocorridas ou estimuladas por alterações provocadas na estrutura dos materiais no momento da confecção dos mesmos; a diminuição da vida de componentes industriais em função da aceleração do processo de fadiga e propagação de trincas inerentes ao processo de fabricação (LIMA & VIEIRA, 2002).

Vale destacar que nem sempre este rompimento deve ser atrelado aos processos de usinagem, uma vez que, um único componente é submetido a vários processos desde o início até o término de seu processo de confecção; é sabido que não é apenas o processo de usinagem que provoca tais alterações, pois há também o processo de soldagem como um causador de falhas, como exemplo a *HAZ (heat affect zone)* estudada por inúmeros trabalhos ligados a área de soldagem (LIMA & VIEIRA, 2002).

3. EFEITO DE PARÂMETROS DE USINAGEM – CASOS JÁ ESTUDADOS

Como já visto anteriormente, a integridade superficial foi mencionada, pela primeira vez, na década de 60 e no início da década de 70 é que, oficialmente, se tornou um campo de estudos durante a 21ª Assembléia Geral do CIRP, que aconteceu em setembro de 1971.

Brinksmeier et al, no ano de 1982 apresentam um artigo detalhando o conceito de tensão residual, nos anais do CIRP82, abordando algumas particularidades deste fenômeno, formas de medição, sinalizando algum tipo de correlação da tensão residual com os processos de usinagem.

Shaw, em 1994, alerta para a ocorrência de formação da CAC (HAZ) ao longo da superfície e subsuperfície de peças confeccionadas pelo processo de retificação em condições de usinagens tidas como mais severas. O autor faz um breve comparativo entre duas situações diferentes de usinagem: uma em condições mais usuais e outra em condições otimizadas, concluindo com a constatação da ocorrência de alterações à integridade superficial de peças.

Em 1996 ABRAO e ASPINWALL, propõem uma análise comparativa entre os resultados obtidos em peças submetidas aos processos de torneamento e retificação onde em algumas peças obtidas pelo processo de torneamento de acabamento foram identificadas tanto camadas escuras (interface) como camadas claras (CAC), denominadas pelos autores de UTM e OTM respectivamente, já nas peças usinadas no processo de retificação pesada os autores constataram apenas a presença da camada branca (CAC), identificada como martensítica em maior espessuras que as encontradas nas peças torneadas.

VIEIRA. *et al*, em seus estudos abordam a ocorrência de alterações metalográficas, formação da CAC nas superfícies e subsuperfícies de peças (confeccionadas em diferentes materiais) submetidas a processos de retificação cilíndrica e plana; observa-se nos resultados das análises uma forte correlação entre a profundidade da CAC com os parâmetros de corte utilizados. E, em materiais sinterizados identificou-se a disfunção de propriedades como a auto-lubrificação comprometendo a utilização dos componentes pós usinagem (VIEIRA. *et al*, 1998; VIEIRA. *et al*, 2001).

Lima, em seus estudos apresenta resultados do comportamento dos macro e micro determinantes de qualidade de peças em aço ABNT 4340, submetidas ao processo de furação HSC sem fluido de corte. Neste trabalho caracterizou-se o comportamento assumido pelos desvios de forma das peças, o erro de posição da ferramenta através da medição em MMC (máquina de medir por coordenadas) e o comportamento da integridade superficial e subsuperficial do material das peças analisando a tensão residual, a microdureza e a formação da CAC. (LIMA, 2002).

Jacobson traz uma abordagem, na qual correlaciona a velocidade de corte (VC) com a integridade superficial de peças em aços, submetidas a processos de torneamento. Com isso, o autor identifica a ocorrência de situações favoráveis proporcionadas pelas alterações na integridade superficial (JACOBSON, 2002).

Hioki em seu doutoramento defendeu a influência da integridade superficial no tempo de vida (longevidade) de moldes e matrizes confeccionadas em fresamento HSM. Ele propôs uma correlação da integridade superficial a que refere como desempenho tribológico da peça; paralelo a esta análise o trabalho faz referências a relações entre os parâmetros de corte utilizados com a influência da estabilidade na integridade superficial da peça analisada, este foi motivado pelas discrepâncias

encontradas entre os tempos de vida encontrados entre um componente e outro (moldes e matrizes) (HIOKI, 2006).

Catai relata que em seus experimentos pôde constatar variações significativas na circularidade, no estado de tensão residual e na microestrutura de peças em aço V_c 131, submetidas ao processo de usinagem de retificação cilíndrica, diretamente à condição de lubrefrigeração. Os experimentos desenvolvidos utilizaram dois tipos diferentes de fluído de corte, com as condições de usinagem fixadas, objetivando a identificação da influência da condição de lubrefrigeração sob as variáveis de saída analisadas (CATAI *et al*, 2007).

Esta mesma preocupação, relacionada com as alterações nas características dos materiais, aliadas ao uso ou não de fluído de corte, motivou Tedesco a explorar em seus estudos este comportamento dentro do processo de torneamento de um aço ASI 4140. Em seus ensaios ele varia alguns parâmetros de corte alternando entre usinagem a seco e com fluído de corte, podendo constatar algumas alterações significativas entre as amostras (TEDESCO *et al*, 2008).

Delijacovi, em suas pesquisas sobre o processo de torneamento de aço DIN 100CrMn6, constata que mesmo não havendo alterações em duas das variáveis de saída analisadas, pode ser constatado nos resultados da análise de tensão alterações significativas mostrando, inclusive, a formação de comportamento de tendências relacionadas aos parâmetros de corte. Relaciona, ainda, tais alterações ao desempenho da peça no momento de sua utilização (DELIJACOV *et al*, 2008).

Rech, em um de seus trabalhos, explora a utilização de uma operação de usinagem posterior, com cintas abrasivas, em peças pós usinagem de torneamento de precisão em material endurecido, visando o restabelecimento das características de integridade destas peças. No desenvolvimento de seu procedimento Rech realiza

algumas análises comportamentais do estado de tensão do material e constata a eficiência deste método para moldar a característica de integridade superficial do material em relação a sua utilização (RECH *et al*, 2008).

Lecanda manifesta preocupações em desenvolver uma nova metodologia para definir a rugosidade superficial das peças, frisando a grande importância que esta variável de saída representa para a utilização da peça. Relatando a importância de se ter controle sobre a rugosidade superficial, esta variável afeta diretamente outras características críticas da peça, como resistência, atrito, fadiga e dureza a quente. (LECANDA *et al*, 2008).

Em 1996 ABRAO e ASPINWALL, propõem uma análise comparativa entre os resultados obtidos em peças submetidas aos processos de torneamento e retificação onde em algumas peças obtidas pelo processo de torneamento de acabamento foram identificadas tanto camadas escuras (interface) como camadas claras (CAC), denominadas pelos autores de UTM e OTM respectivamente, já nas peças usinadas no processo de retificação pesada os autores constataram apenas a presença da camada branca (CAC), identificada como martensítica em maior espessuras que as encontradas nas peças torneadas.

Percebe-se um volume considerável de trabalhos sendo desenvolvidos nesta área de estudo e nota-se a existência de inúmeros trabalhos ocorrendo de forma isolada, não enxergando o processo de usinagem como um todo. Sendo cada pesquisa direcionada a um único processo e nem sempre as análises desenvolvidas, supostamente no controle e identificação das características relacionadas à integridade superficial são abordadas no mesmo contexto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados, de maneira detalhada, os materiais, equipamentos e procedimentos necessários para o desenvolvimento dos ensaios e das análises realizados para construção deste trabalho. Os ensaios e as análises foram realizados, conforme seqüência apresentada no roteiro de desenvolvimento da pesquisa experimental (*Figura 6*).

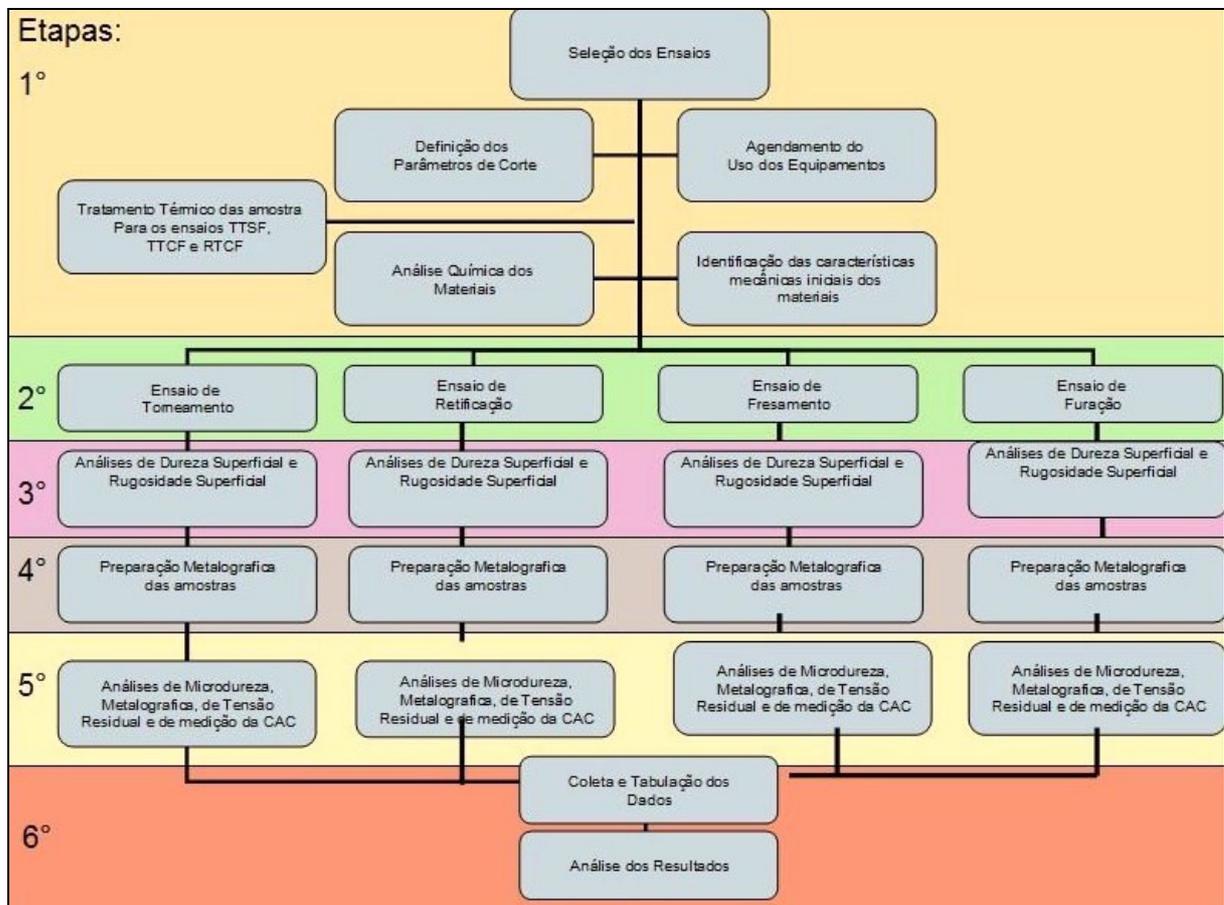


FIGURA 6: ROTEIRO DE EXPERIMENTO

Ao longo do texto que segue é descrita cada uma das etapas apresentadas no roteiro de experimento da Figura 6. A figura esquematiza, de maneira roteirizada, como foi executada a parte experimental do trabalho. A divisão ocorreu em 6 etapas, classificadas na ordem cronológica em que foram desenvolvidas, criando uma

melhor agilidade no desenvolvimento de cada item das etapas, em função da alocação dos equipamentos e máquina utilizados para cada etapa.

A pesquisa foi dirigida a quatro diferentes processos de usinagem, fato que, automaticamente, remete a pesquisa ao desenvolvimento de, pelo menos, quatro diferentes ensaios. O detalhamento dos procedimentos experimentais, principalmente no que se refere à realização dos ensaios, é apresentado dividido por processos de usinagem.

Assim, tem-se, em detalhe, os procedimentos de cada um dos processos de usinagem explorados no trabalho:

- ✓ Ensaio de Torneamento.
- ✓ Ensaio de Retificação Cilíndrica.
- ✓ Ensaio de Fresamento de topo.
- ✓ Ensaio de Furação.

4.1. MATERIAL DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios desenvolvidos neste trabalho tiveram como início a definição do material a ser usinado. Optou-se por desenvolver os estudos em um aço ABNT 4340 devido a sua grande utilização no setor industrial, por suas características mecânicas, de usinabilidade e de temperabilidade (VIEIRA *et AL*, 2003).

Após a definição do material, realizou-se a análise química da barra e da chapa a serem ensaiadas. Para tais análises contou-se com o apoio do laboratório de análise de materiais, parceiro da universidade, o “Labteste Análise e Ensaio de Materiais”, localizado na cidade de Santa Bárbara D`Oeste – SP.

O resultado desta análise química pode ser visto no Quadro 2.

Componente	%	Componente	%
C	0,3900	V	0,0049
Si	0,2760	W	0,0380
Mn	0,6400	PB	0,0061
P	0,0190	B	0,0005
S	0,0100	Sn	0,0100
Cr	0,7300	Zn	0,0020
Ni	1,7900	As	0,0059
Mo	0,2160	Bi	0,0033
Al	0,0160	Ca	0,0009
Cu	0,2380	CE	0,0030
Co	0,0380	Zr	0,0015
Ti	0,0027	La	0,0010
Nb	0,0030	Fe	95,6000

QUADRO 2: ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO ABNT 4340

Definido o resultado da análise química e constatado que, de fato, o material atende às especificações das normas regulamentadoras, partiu-se para a fase de definição dos parâmetros de usinagem para o desenvolvimento dos ensaios e a confecção dos corpos de prova, nas dimensões e nos formatos adequados para cada ensaio. Os formatos dos corpos de prova utilizados são apresentados em detalhes no procedimento experimental dos respectivos processos.

Além da análise química foi realizada uma análise de identificação do estado de dureza inicial do material a ser utilizado ao longo dos ensaios, foi constatada uma dureza inicial numa faixa entre 15 – 19 HRC.

4.2. MÁQUINAS-FERRAMENTAS

Todos os ensaios desenvolvidos para a pesquisa experimental do presente trabalho foram realizados nos laboratórios da própria universidade, em máquinas-ferramenta específicas para cada ensaio, as quais são mais bem apresentadas no texto a seguir.

Os ensaios práticos do Processo de Torneamento foram desenvolvidos em um centro de torneamento universal programável CNC, da fabricante de máquinas-ferramenta Romi, da Série Multiplic, modelo 30 D.

Os ensaios práticos, do Processo de Retificação, foram realizados numa retificadora cilíndrica CNC, do fabricante de máquinas-ferramenta FERDIMAT, equipada com o comando numérico interativo. Os ensaios de retificação contaram com o auxílio de um equipamento de monitoramento de emissão acústica.

O Processo de furação e fresamento foram desenvolvidos num Centro de Usinagem, da fabricante de máquinas-ferramenta Romi, modelo Discovery 760 de 4 eixos, com comando numérico da marca Siemens.

4.3. FERRAMENTAS

A ferramenta utilizada para a realização dos ensaios de torneamento foi Inseto de metal duro da marca *Sandvik Coromant*, referência TNMG 332 – PM 4235 r08 – PM.

Para o ensaio de retificação cilíndrica foi utilizado um rebolo abrasivo do tipo AA – Óxido de Alumínio Branco, com perfil de corte, disposto em ângulo em relação à superfície a ser usinada da peça, conforme configuração do cabeçote porta ferramenta da retificadora; o diâmetro médio do rebolo 370 mm e perfil útil de corte aproximado de 54 mm representando a largura de corte.

Para os ensaios do processo de furação a ferramenta utilizada, selecionada através de catálogo *TITEX PLUS*, broca inteiriça de metal duro P40, com diâmetro nominal 10 mm, tipo *ALPHA 2* versão direita, conforme a Norma DIN 6537K e DIN 6535HA para a haste, com cobertura TINAL FUTURA (modelo A3265 TFL).

No ensaio de fresamento foi utilizada uma fresa de topo com três pastilhas; as ferramentas utilizadas foram de metal-duro, segundo codificação do fornecedor R390 – 11 T3, diâmetro de 20 mm e raio de ponta 0,8 mm com dispositivo R290 – 020 A 2011 da marca *Sandvik Coromant*.

4.4. CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram confeccionados em Aço ABNT 4340, extraídos a partir de uma mesma barra, de diâmetro 50,8 (mm) x 4000 (mm) de comprimento, desta barra após análise iniciais acima citadas foram extraídos os corpos de prova, sendo que alguns destes passaram pelo tratamento térmico de tempera e revenimento elevando sua dureza da faixa inicial de 15 – 19 HRC para a faixa de 53 – 55 HRC variando assim o estado do material dos corpos de prova em Beneficiados e Temperado/Revenido.

Nos ensaios de retificação foram utilizados apenas no estado temperado/revenido, com dureza inicial variando em torno de 53 - 55 HRC; nos ensaios de torneamento foram utilizados materiais nos dois estados, sendo que na condição de beneficiado o material apresenta uma dureza inicial em torno de 15 -19 HRC. Para o ensaio de torneamento, foi utilizado o mesmo formato de corpo de provas (CP), conforme as dimensões apresentadas na Figura 7.

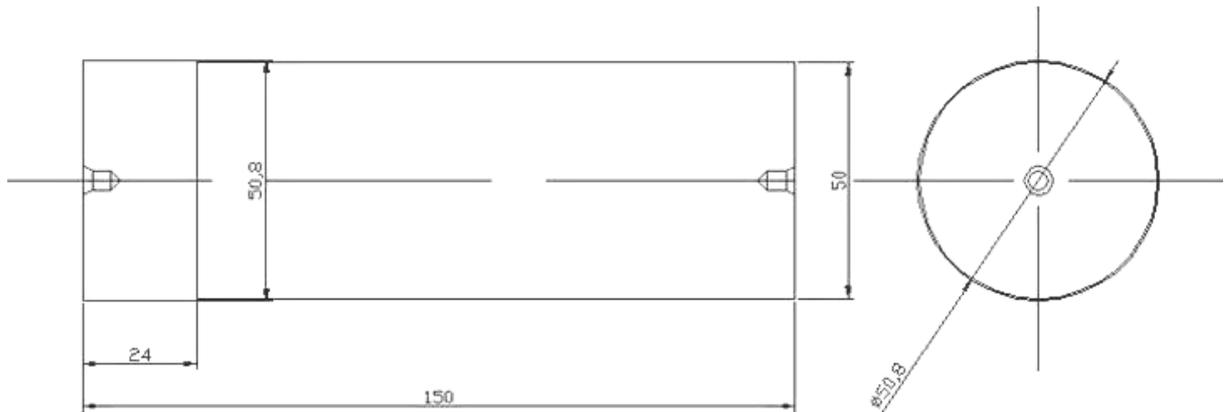


FIGURA 7: CP PARA ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Os ensaios de torneamento foram realizados em duas condições diferentes de tratamento dos materiais, sendo uma no estado temperado/revenido e outro beneficiado, fato que apresenta, no final dos ensaios, dimensões diferentes entre estes dois grupos de corpos de prova, em função dos diferentes parâmetros de a_p utilizados.

Resumidamente o formato destes corpos de prova tem diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 150 mm, sendo que deste comprimento 24 mm foram direcionados à fixação do CP na placa do torno. Os 126 mm de comprimento restantes foram divididos em 9 pistas (amostras), sendo que cada uma delas assume um comprimento de 14 mm, direcionados a cada condição de corte.

Pode-se observar na *Figura 8* que para cada um dos corpos prova, do processo de torneamento, foram realizadas 9 pistas ao longo da extensão de sua superfície, nas quais foram variadas as condições, tendo, assim, em cada um dos corpos de prova as 9 amostras a serem analisadas.

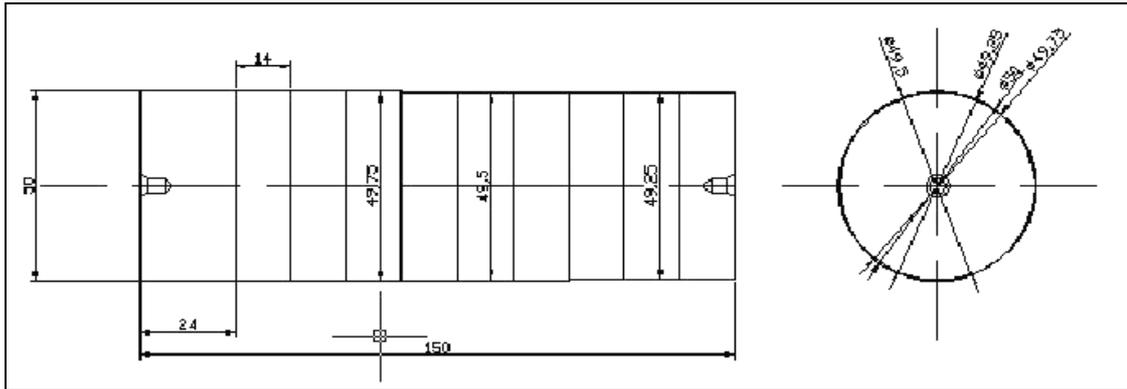


FIGURA 8: CP TEMPERADO/REVENIDO APÓS ENSAIOS DE TORNEAMENTO

Os corpos de prova utilizados para os ensaios do processo de retificação cilíndrica foram retirados da mesma barra de aço utilizada no ensaio do processo de torneamento, e apenas utilizada no estado temperado/revenido, variando apenas algumas dimensões e pequenos detalhes na forma, onde no processo de retificação cada CP dividiu-se apenas em 3 pistas (amostras), tendo em vista uma limitação representada pela dimensão da secção de corte do reboło abrasivo utilizado no ensaio.

Tanto para os ensaios do processo de fresamento, quanto para o de furação os corpos de prova utilizados seguiram, basicamente, o mesmo formato, variando apenas a espessura da chapa sendo uma de 12 mm e outra de 26,5 mm

Embora não tenham sido apresentadas as análises químicas dos dois materiais utilizados, estas análises foram desenvolvidas, replicando em dois pontos diferentes dos materiais, sendo que os resultados encontrados se assemelham muito, suprimindo, desta forma, a necessidade de apresentação das duas análises dos ensaios.

4.5. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessária a realização de um conjunto variado de análises; para cada uma delas foram utilizados diferentes equipamentos de medição e inspeção. Dentre as análises pode-se citar como relevante a análise de microdureza, rugosidade superficial, dureza superficial, dentre outras. Dos equipamentos utilizados segue breve descrição ao longo do texto.

4.5.1. RUGOSIMETRO DIGITAL

O equipamento utilizado para realização da análise de rugosidade superficial dos corpos de provas foi um rugosímetro digital portátil da marca *Mitutoyo*, modelo *Suftest 211*, do laboratório de metrologia da FEAU-UNIMEP.

4.5.2. MICRODURÔMETRO

O Microdurômetro utilizado, no Laboratório de Materiais da FEAU/UNIMEP foi um microdurômetro da marca *Shimadzu* do Brasil, modelo HMV, no qual foi utilizado nos ensaios carga HV0,2 (200g).

4.5.3. DUROMÊTRO

O duromêtro utilizado para a análise de dureza superficial das amostras, é da marca Galileo, número de identificação 104049, de propriedade do Laboratório de Análise e Ensaio de Materiais – Labteste. Este equipamento estava calibrado para o método Rockwell Superficial, e instalado adequadamente, segundo recomendações técnicas.

4.5.4. MICROSCÓPIO METALOGRÁFICO

Para a aquisição de imagens foi utilizado um microscópio metalográfico da marca NIKON, modelo Microflex HFM, *Photomicrographic Attachments*, revisado e aferido. A este equipamento foi acoplada uma câmera CCD Hitachi monocromática, ligada a um microcomputador; as imagens foram captadas e posteriormente analisadas com auxílio de um software analisador de imagem chamado “Image J”. Foi montada uma bancada de ensaios montada com os referidos equipamentos utilizados no desenvolvimento da análise da CAC, análise metalográfica das superfícies e subsuperfícies dos corpos de prova e da análise do arranjo cristalográfico destes.

Outro microscópio utilizado durante o desenvolvimento dos ensaios foi um stereoscópio instalado no mesmo laboratório citado, este equipamento foi utilizado para identificação de possíveis desgastes nas arestas de corte de ferramentas utilizadas nos ensaios.

4.5.5. ANALISADOR DE TENSÃO RESIDUAL

Para o desenvolvimento das análises de tensão residual foi utilizado o equipamento *Automatic X-Ray Residual Stress Analyzer*, modelo *Digital Fastress Residual Stress Analyzer* do fabricante MDI (Metro Design Inc.). Este equipamento é de propriedade da empresa Eaton, unidade Valinhos e pode ser visto em detalhe na Figura 9.



FIGURA 9: ANALISADOR DE TENSÃO RESIDUAL

4.6. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS DESENVOLVIDOS

Com o intuito de facilitar a construção do texto e facilitar o desenvolvimento das descrições das análises, é utilizada a nomenclatura criada para estes ensaios, sendo que cada um dos 7 ensaios são referidos conforme as siglas abaixo:

- ✓ TBSF – ensaio de torneamento do aço ABNT4340 no estado beneficiado sem o uso de fluído de corte.
- ✓ TBCF – ensaio de torneamento do aço ABNT4340 no estado beneficiado com o uso de fluído de corte.
- ✓ TTSTF – ensaio de torneamento do aço ABNT4340 no estado temperado/revenido sem o uso de fluído de corte.
- ✓ TTCTF – ensaio de torneamento do aço ABNT4340 no estado temperado/revenido com o uso de fluído de corte.
- ✓ RTCTF – ensaio de retificação cilíndrica do aço ABNT4340 no estado temperado/revenido com o uso de fluído de corte.
- ✓ FBSF – ensaio de fresamento de topo do aço ABNT4340 no estado beneficiado sem uso de fluído de corte.

- ✓ FUBSF – ensaio de furação do aço ABNT4340 no estado beneficiado sem o uso de fluido de corte.

4.6.1. DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE TORNEAMENTO

O ensaio de torneamento, dentre os ensaios realizados foi o que teve o maior número de amostras confeccionadas, este processo teve um direcionamento maior, dada a sua vasta gama de utilização em relação aos outros processos.

Os ensaios do processo de torneamento foram desenvolvidos, em aço ABNT 4340, em dois diferentes estados de tratamentos, fato que impõe a necessidade de propriedades diferentes às peças no momento da usinagem.

Destas diferenças pode-se salientar a grande variação na gama de dureza entre os corpos de prova, que vão de uma dureza 15 -19 HRC (TBCF e TBSF) no estado beneficiado, até uma dureza de 53-55 HRC (TTCF e TTSE) no estado temperado/revenido.

Embora os corpos de prova tenham recebido diferentes tratamentos, todos foram extraídos da mesma barra de aço; este tratamento foi realizado nos corpos de provas com seu formato já definido.

O ensaio de torneamento foi subdividido em 4 (quatro) grupos sendo separados em função do tipo de tratamento térmico do material e com relação à condição de lubri-refrigeração conforme definido anteriormente.

Esta subdivisão dos ensaios de torneamento foi importante, pois com ela iniciou-se o processo de definição dos parâmetros de corte utilizados para os ensaios de torneamento. As variações nas durezas dos corpos de prova, em função dos tipos de tratamentos térmicos apresentados, exigiram adequação dos parâmetros de cortes a serem escolhidos.

O conjunto de corpos de prova utilizados para o ensaio de torneamento foi formado por um número de 12 (doze) corpos de prova, sendo que cada um destes foi dividido em 9 (nove) pistas, ou seja, 9 (nove) amostras a serem analisadas, totalizando uma quantidade de 108 (cento e oito) amostras a serem extraídas dos ensaios de torneamento. Todos os corpos de prova utilizados para o desenvolvimento dos ensaios de torneamento respeitaram o mesmo formato e dimensões.

Conforme já mencionado no item 4.4, o formato destes corpos de prova tem o diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 150 mm, sendo que deste comprimento 24 mm foi direcionado a fixação do CP na placa do torno, além da fixação do contra ponto, feita por meio de furo de centro. Os 126 mm restantes do comprimento, foram divididos em 9 pistas (amostras), sendo que cada uma delas assumem um comprimento de 14 mm, direcionados a cada condição de corte.

Em função das dimensões dos corpos de prova os ensaios foram desenvolvidos entre pontos, buscando maior rigidez no ensaio minimizando possíveis erros macro-geométricos provenientes de instabilidades no momento da usinagem os corpos de prova foram fixados ao longo dos ensaios.

Os parâmetros de corte do processo de usinagem destes ensaios foram escolhidos de modo a atender às condições de uso tanto industrial quanto à pesquisa acadêmica desenvolvida, esta preocupação se manteve ao longo dos quatro grupos de ensaio do processo de torneamento.

As três velocidades de corte (V_c) também foram mantidas constantes para os quatro grupos de ensaio e tiveram como base de determinação de seus valores os corpos de prova temperados/revenidos, em função dos valores de dureza

encontrados nestes materiais, superiores aos encontrados nos corpos de prova beneficiados.

Cada CP, ou seja, ao longo das nove pistas sempre se trabalhou com a mesma V_c (V_c 01 = 80 m/min; V_c 02 = 100 m/min e V_c 03 = 120 m/min). Variando apenas outros dois parâmetros de corte a velocidade de avanço (v_f) e a profundidade de corte (a_p), estes dois parâmetros tiveram a intensidade de seus valores variando entre os ensaios dos quatro grupos, sendo que para os grupos TBSF e TBCF foram utilizados um conjunto de valores e para os grupos TTSF e TTCF um segundo conjunto de valores. Estes conjuntos de valores são apresentados em detalhe no *Quadro 3*, onde também aparece a divisão de utilização dos dados.

TBSF e TBCF					
f_n 01	0,35	mm/ver	a_p 1	0,75	mm
f_n 02	0,25	mm/ver	a_p 2	0,50	mm
f_n 03	0,15	mm/ver	a_p 3	0,25	mm
TTSF e TTCF					
f_n 01	0,15	mm/ver.	a_p 1	0,375	mm
f_n 02	0,10	mm/ver.	a_p 2	0,250	mm
f_n 03	0,05	mm/ver.	a_p 3	0,125	mm

QUADRO 3: PARÂMETROS DE CORTES UTILIZADOS

A ferramenta escolhida para ser utilizada na execução dos ensaios demonstraram um comportamento de alto desempenho relacionado a sua resistência aos desgastes a que foi exposta; tal característica foi evidenciada em um experimento que antecedeu a realização do ensaio do processo de torneamento. Nesse experimento inicial ela demonstrou alta resistência e longevidade, principalmente quando utilizada para usinar materiais com características de dureza relativamente baixas, similar às condições encontradas nos corpos de prova

beneficiados; este experimento foi executado com o propósito de definição de parâmetros de corte adequados para o cenário específico dos ensaios.

Tendo em vista esta característica, os ensaios foram conduzidos, com uma metodologia focada na análise constante do comportamento de desgaste da aresta efetiva de corte da ferramenta, objetivando a preservação das características geométricas de cortes destas ferramentas, evitando, assim, inserção de mais uma variável no processo.

A cada ensaio (usinagem de uma pista) ocorre a interrupção do programa, para a realização de uma troca de aresta de corte (programa CNC anexo ao trabalho), para posterior análise de suas superfícies de corte destas ferramentas, em um microscópio stereoscópico, por uma aresta nova ou que a tenha passado por tal análise.

A Figura 10, apresenta a imagem de uma das referidas análises de desgaste da aresta de corte desenvolvidas, na qual pode ser observado o aparecimento de alterações de coloração da superfície de corte das arestas analisadas, fato que desqualificou estas ferramentas à continuidade dos ensaios, exigindo, desta forma, a substituição da aresta em questão. Esta alteração não é perceptível sem a utilização de tal recurso.

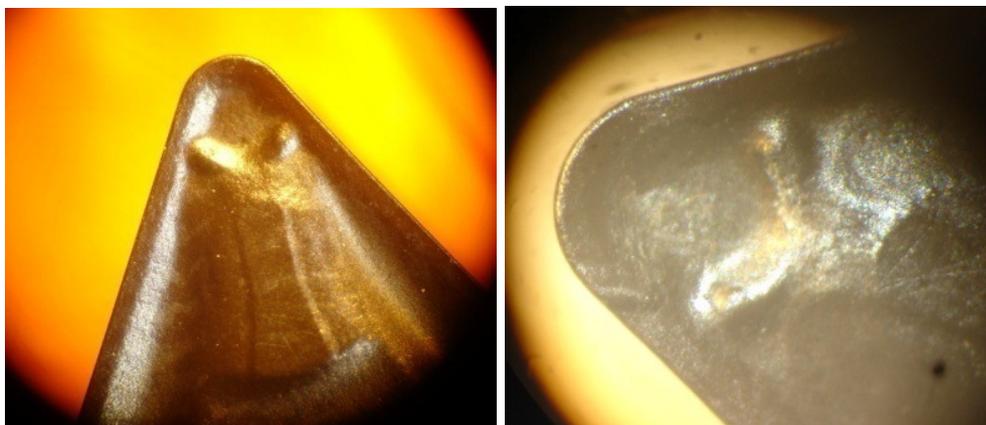


FIGURA 10: IMAGENS DE ANÁLISE DE DESGASTE DAS ARESTAS DE CORTE

Como era esperado, o consumo de arestas de cortes em função do desgaste, foi mais significativo nos ensaios realizados em corpos de prova temperados/revenidos (TTCF e TTSF); já nos ensaios com corpos de prova beneficiados (TBCF e TBSF) o desgaste assumiu um comportamento lento e pouco significativo.

Vale ressaltar que, independente do desgaste apresentado pela aresta de corte, esta ferramenta, em nenhum dos casos, foi utilizada por mais de três ensaios, ou seja, o número máximo de ensaios realizados por aresta ficou fixado em três amostras.

4.7. DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE RETIFICAÇÃO

O ensaio de retificação cilíndrica deu início à elaboração dos programas CNC, utilizando uma operação de mergulho, adequando-o para a confecção dos corpos de prova selecionados para os ensaios, ou seja, feito o dimensionamento do conjunto ferramenta/peça/máquina para as condições necessárias.

Tanto a escolha dos parâmetros de corte, como o estado do material dos corpos de prova, teve como prioridade, a busca por condições mais próximas da realidade industrial desta operação.

As condições de usinagem utilizadas para o desenvolvimento dos ensaios foram a variação entre três diferentes avanços, os quais foram chamados de f_{n01} , f_{n02} e f_{n03} (0,05, 0,1 e 0,15 avanço por inversão respectivamente), três velocidades de corte sendo V_{c01} , V_{c02} e V_{c03} (40, 30 e 20 m/s respectivamente), e duas profundidades de corte a_{p1} e a_{p2} (0,5 e 0,75 mm); os corpos de prova se mantiveram a uma rotação constante, para todas as amostras rotação de 50 rpm,

estes parâmetros utilizados podem ser vistos de maneira mais evidente no Quadro 4.

RTCF					
V _c 01	20m/s	f _n 01	0,05mm/rev	a _p 1	0,50mm
V _c 02	30m/s	f _n 02	0,10mm/rev	a _p 2	0,75mm
V _c 03	40m/s	f _n 03	0,15mm/rev		

QUADRO 4: PARÂMETRO DE CORTE UTILIZADO

Para cada amostra ensaiada, foram realizadas dressagens do rebolo abrasivo, através dos ciclos de diamantação da própria máquina-ferramenta, com o objetivo de manter constantes as condições de corte da ferramenta abrasiva, ao longo do ensaio. Desta forma, as dressagens foram realizadas logo após a execução de cada uma das amostras, mantendo as mesmas características no perfil de corte da ferramenta abrasiva. Assim, foram mantidas as condições para todas as amostras, a velocidade do rebolo na dressagem foi mantida constante em 40 m/s. e as outras variáveis controladas pela própria máquina-ferramenta, pois as condições dressagens foram executadas pela rotina de trabalho pré-estabelecida em seu menu de diamantação.

O

Quadro 5 apresenta como foram combinados os parâmetros de corte para a realização dos ensaios amostras por amostras (pistas), seguindo numeração corrida, atribuída para todas as amostras envolvidas no estudo.

A esquematização dos ensaios de retificação foi realizada de tal forma que todas as variáveis fossem combinadas entre si, podendo, assim, identificar as possíveis alterações provocadas por cada uma dessas variáveis elencadas, conforme estruturação apresentada no Quadro 5.

CP 13				CP 16			
Pista 109	V _c 01	a _p 1	f _n 01	Pista 118	V _c 02	a _p 2	f _n 01
Pista 110	V _c 01	a _p 1	f _n 02	Pista 119	V _c 02	a _p 2	f _n 02
Pista 111	V _c 01	a _p 1	f _n 03	Pista 120	V _c 02	a _p 2	f _n 03
CP 14				CP 17			
Pista 112	V _c 01	a _p 2	f _n 01	Pista 121	V _c 03	a _p 1	f _n 01
Pista 113	V _c 01	a _p 2	f _n 02	Pista 122	V _c 03	a _p 1	f _n 02
Pista 114	V _c 01	a _p 2	f _n 03	Pista 123	V _c 03	a _p 1	f _n 03
CP 15				CP 18			
Pista 115	V _c 02	a _p 1	f _n 01	Pista 124	V _c 03	a _p 2	f _n 01
Pista 116	V _c 02	a _p 1	f _n 02	Pista 125	V _c 03	a _p 2	f _n 02
Pista 117	V _c 02	a _p 1	f _n 03	Pista 126	V _c 03	a _p 2	f _n 03

QUADRO 5: COMBINAÇÃO DOS PARÂMETROS UTILIZADOS NO ENSAIO

Para os ensaios de retificação cilíndrica o CP foi dividido em três pistas, cada um conforme apresentado na Figura 11, que apresenta, em detalhe, um CP passando pela execução do ensaio da última amostra (pista) deste CP.

Os ensaios do processo de retificação tiveram de ser realizados em alguns estágios dos quais se podem descrever, tomando como base o CP apresentado na Figura 11:

1. com o rebolo já dressado e com o programa da referida pista no modo de execução, inicia-se a confecção da primeira pista (109);
2. finalizado o ensaio desta amostra o rebolo é novamente diamantado e selecionado o programa da pista 2 (110);
3. realiza-se a confecção do ensaio da pista 2 (110);
4. finalizado o ensaio da pista 2 (110) o rebolo é novamente diamantado, retira-se a peça do dispositivo contra-ponto;
5. realiza-se a inversão do sistema de arraste para a outra extremidade do CP;
6. realiza-se a confecção da pista 3 (111);

7. finalizado o ensaio da pista 3 (111) o rebolo é novamente diamantado, retira-se a peça do dispositivo contra-ponto; e

8. realizam-se as alterações necessárias no programa e na máquina-ferramenta, para receber novo CP.

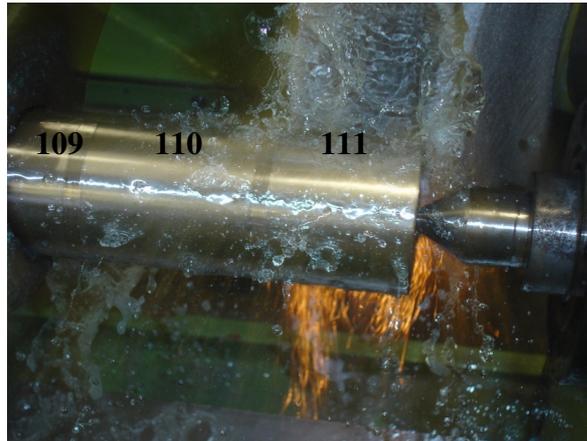


FIGURA 11: CP NO ENSAIO DE RETIFICAÇÃO, PISTAS (109-111)

Todos os ensaios realizados nos processos de retificação fizeram uso de fluído de corte solúvel (semi sintético) em abundância tentando, mais uma vez, reproduzir condições reais do cenário das indústrias metal mecânicas, como pode ser observado na Figura 11, imagem no momento da execução de um ensaio.

4.8. DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE FRESAMENTO

Os ensaios realizados para o processo de fresamento de topo (FBSF) foram desenvolvidos tendo como parâmetros de corte os dados relacionados no *Quadro 6* tais parâmetros foram definidos respeitando as especificações de ferramentas e da máquina-ferramenta, além de atender as necessidades de pesquisa e condições usuais em cenários industriais.

V _c 01	80 m/min	f _z 01	0,100	mm/volta	a _p 1	0,75mm
V _c 02	100 m/min	f _z 02	0,083	mm/volta	a _p 2	0,50mm
V _c 03	120 m/mim	f _z 03	0,050	mm/volta		

QUADRO 6: PARÂMETROS DE CORTE DO ENSAIO DE FRESAMENTO

Os parâmetros apresentados no *Quadro 6* combinam entre si com objetivo de proporcionar ao ensaio condições diferentes de ensaio para cada amostra usinada; esta combinação segue conforme estruturado no Quadro 7. Diferente da seqüência apresentada nos ensaios anteriores, no ensaio FBSF as amostras foram confeccionadas seguindo uma lógica, em que foi fixada a profundidade (a_p1 e a_p2) e variaram-se os parâmetros de VC e avanço por dente (V_c1, V_c2, V_c3, f_z1, f_z2 e f_z3).

V _c	a _p	f _z	Pista	V _c	a _p	f _z	Pista	V _c	a _p	f _z	Pista
1	2	1	127	2	2	1	130	3	2	1	133
1	2	2	128	2	2	2	131	3	2	2	134
1	2	3	129	2	2	3	132	3	2	3	135
1	1	1	136	2	1	1	139	3	1	1	142
1	1	2	137	2	1	2	140	3	1	2	143
1	1	3	138	2	1	3	141	3	1	3	144

QUADRO 7: COMBINAÇÃO DOS PARÂMETROS

Com relação à preservação da condição de desgaste das ferramentas seguiu-se o mesmo critério adotado para o ensaio de torneamento, ou seja, foram inseridas ao programa CNC, interrupções entre cada uma das pistas usinadas e nelas as arestas de corte eram analisadas uma a uma, com o auxílio de um microscópio stereoscópico. Tem-se a substituição do conjunto das arestas sendo realizada no aparecimento de qualquer indicio de desgaste em uma destas arestas, ou após a realização da usinagem de 3 amostras consecutivas.

A Figura 12 mostra um dos corpos de prova do ensaio FBSF, após ensaio já iniciando o processo de análises.



FIGURA 12: CP APÓS ENSAIO RBSF

4.9. DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE FURAÇÃO

Os ensaios do processo de furação (FUBSF) foram realizados segundo os parâmetros de corte relacionados no Quadro 8. Foram utilizados no desenvolvimento dos ensaios duas relações D/P (relação entre a profundidade do furo e o diâmetro da broca), uma para CP com espessura de 26,5 mm e outra para CP com espessura de 12 mm, sendo esta relação o terceiro parâmetro a ser variado ao longo deste ensaio, assim como nos outros ensaios.

V _c 01	80 m/min	fn 01	0,35	mm/ver	D/P 1	2,65
V _c 02	90 m/min	fn 02	0,25	mm/ver	D/P 2	1,20
V _c 03	100 m/min	fn 03	0,15	mm/ver		

QUADRO 8: PARÂMETROS DE CORTE DO ENSAIO FUBSF

Os parâmetros de corte, utilizados para este ensaio, foram combinados conforme apresentado no Quadro 9, objetivando a utilização de diferentes condições para cada uma das amostras.

V _c	D/P	fn	Pista	V _c	D/P	fn	Pista	V _c	D/P	fn	Pista
1	1	1	154	2	1	1	157	3	1	1	160
1	1	2	155	2	1	2	158	3	1	2	161
1	1	3	156	2	1	3	159	3	1	3	162
1	2	1	145	2	2	1	148	3	2	1	151
1	2	2	146	2	2	2	149	3	2	2	152
1	2	3	147	2	2	3	150	3	2	3	153

QUADRO 9: COMBINAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ENSAIO

Visando não inserir uma nova variável no processo usinagem de furação, a fixação da ferramenta no conjunto suporte/máquina-ferramenta, verificou-se a cada ensaio (execução de cada furo), o comportamento de desgaste e o posicionamento correto da broca.

O posicionamento da broca foi verificado por meio de um relógio comparador fixado na mesa da máquina-ferramenta, verificando possíveis excentricidades apresentadas pela ferramenta (batimento radial), conforme apresentado na Figura 13.



FIGURA 13: VERIFICAÇÃO DE POSICIONAMENTO DA FERRAMENTA

A inspeção de desgaste da broca, ao longo do ensaio, foi realizada seguindo os mesmos procedimentos aplicados para os ensaios dos processos de torneamento e de fresamento, ou seja, foi analisado desgaste a cada furo realizado; uma destas inspeções de desgaste é apresentada na Figura 14.

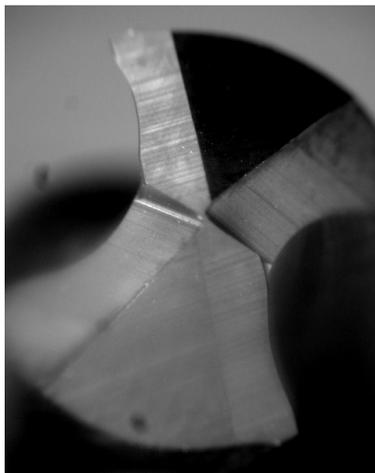


FIGURA 14: INSPEÇÃO DE DESGASTE DA BROCA

A Figura 15 apresenta o CP do ensaio FUBSF, momentos após a realização do ensaio, o qual já iniciava seu processo de preparação para futuras análises.



FIGURA 15: CP DO ENSAIO FUBSF

4.10. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DAS ANÁLISES DESENVOLVIDAS

Após o desenvolvimento dos ensaios (TBCF, TBSF, TTCF, TTSF, RTCF, FBSF e FUBSF) os corpos de provas passaram para a fase de análise, conforme apresentado na Figura 16. Estas análises seguiram uma seqüência para serem desenvolvidas, como segue:

1. análise da rugosidade superficial;
2. análise da dureza superficial;
3. preparação metalográfica das amostras;

4. análise de microdureza;
5. análise metalográfica;
6. análise da CAC;
7. análise da tensão residual.

A seguir, apresenta-se, em detalhe, o procedimento utilizado em cada uma destas análises.

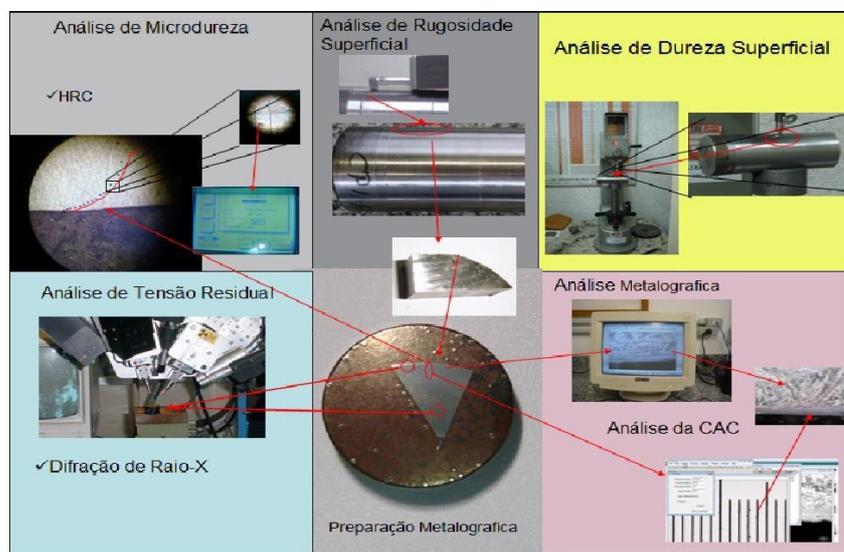


FIGURA 16: CONJUNTO DE ANÁLISES DESENVOLVIDAS

4.10.1. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL

O processo de análise de rugosidade superficial, em primeiro lugar, teve como objetivo a busca de uma única condição de medição, que permitisse atender todas as amostras, independente de suas características físicas e geométricas. Após observações, foi possível constatar que as amostras submetidas aos ensaios de torneamento apresentavam uma restrição (largura da pista a ser analisada); assim, o ensaio foi direcionado a atender estas amostras.

Desta forma, o equipamento utilizado foi configurado para executar as medições na opção segundo o padrão ISO, tendo em vista as dimensões reduzidas das pistas a serem analisadas (ensaios TBCF, TBSF, TTCF e TTSF).

Esta dimensão reduzida apresenta uma distância insuficiente para o desenvolvimento do percurso de Cut-off, do equipamento, necessária para o padrão DIN e, com isso, a rugosidade foi estabelecida pelo comprimento de gráfico do sistema ISO, aplicado para todas as amostras.

Para cada pista foram realizadas duas leituras de rugosidades e extraída a média aritmética entre elas e, para efeito de análise dos resultados, as medidas que prevaleceram foram as medidas com valores em Ra, mais no momento da execução da análise foram obtidos também os valores de rugosidades dados em Ry e Rz.

Na *Figura 17* é apresentada, em detalhe, a imagem de um CP, do ensaio de torneamento, no qual é sinalizado o local aproximado das medições de rugosidades, nas amostras deste ensaio. Ainda nesta imagem podem ser vistas as pistas (amostra) 44, 45 e 46 deste CP.

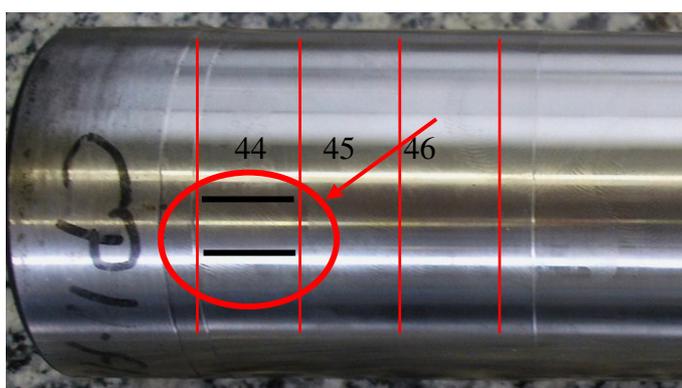


FIGURA 17: DETALHE DA ANÁLISE DE RUGOSIDADE DOS ENSAIOS DE TORNEAMENTO

As medidas, identificadas para CP1, Cp2 e Cp3, pertencem ao ensaio TBSF e as Cp4, Cp5 e Cp6 pertencem ao ensaio TBCF. E as medidas identificadas como

sendo de CP6, Cp7 e Cp8 pertencem ao ensaio TTSTF e as para dos Cp9, Cp10 e Cp11, pertencem ao ensaio TTCTF.

A análise de rugosidade superficial desenvolvida nos corpos de prova dos ensaios de processo de retificação foi realizada similar à análise desenvolvida para definir as condições de rugosidade superficial, dos corpos de prova do processo de torneamento. Para cada pista analisada foram executadas duas medições, em pontos diferentes da amostra, e extraída a média aritmética entre estes valores.

Os resultados das análises de rugosidade superficial, obtidas nos ensaios de Fresamento e de Furação são aqui apresentados apenas em Ra, sendo que para estes ensaios as leituras das medidas em Rz e Ry, passaram a não ser mais relacionadas, uma vez que tais medidas não serão consideradas dentro dos resultados desta análise.

As medidas das rugosidades superficiais, das amostras do ensaio FBSF, foram realizadas em pontos similares entre elas, sempre nas regiões próximas do centro de cada pista analisada e, assim como nos ensaios anteriores, foram feitas duas medições em pontos diferentes e extraída a média entre estes valores.

Na Figura 18, apresenta-se, em detalhe, a região das amostras em que foi realizada a análise de rugosidade superficial nas amostras do ensaio FBSF, sendo que a região de análise é a região cercada pelo círculo e as duas linhas estão representando o percurso do percorrido pelo equipamento para coletar os dados.

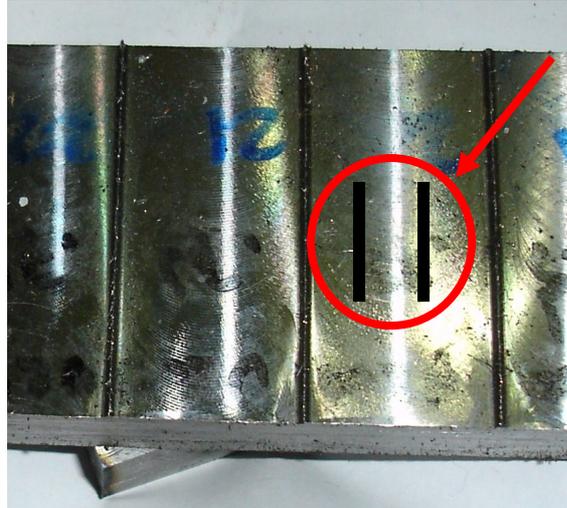


FIGURA 18: DETALHE DA ANÁLISE DE RUGOSIDADE (FBSF)

A análise de rugosidade superficial, realizada nas amostras confeccionadas pelo ensaio de furação (FUBSF), foi desenvolvida seguindo os mesmos critérios adotados nos ensaios anteriores. Tendo como diferença apenas o posicionamento do local das leituras, para coleta de dados nas amostras; tal diferença se deu em função do formato das amostras analisadas como pode ser visto na Figura 19.

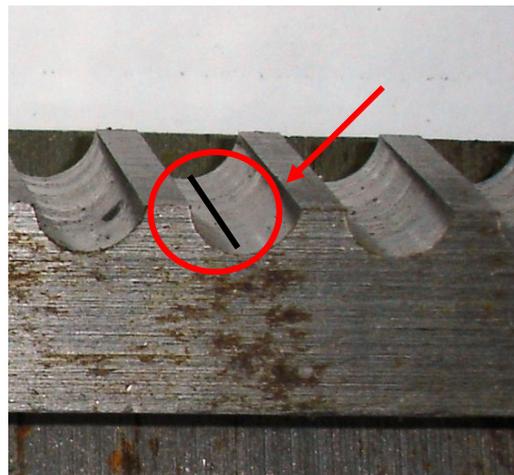


FIGURA 19: REGIÃO DE ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL (FUBSF)

Os valores de rugosidades encontrados e relacionados acima serão confrontados ao longo do estudo, com o propósito de identificar, dentre os

parâmetros de usinagem utilizados, qual parâmetro apresenta a maior influência com relação às alterações no comportamento da rugosidade superficial. Primeiramente e com mais ênfase, num estudo individualizado, analisando cada um dos sete ensaios realizados e, num segundo momento, buscando similaridades da influência dos parâmetros de corte entre os ensaios.

4.10.2. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL

As análises de dureza superficial foram realizadas, em um laboratório especializado em análises de materiais (Labteste), onde foi utilizado um durômetro, configurado para a realização de leituras de dureza superficiais pelo método 15N; desta forma, foi desenvolvido o levantamento do comportamento de dureza apresentado pelos corpos de prova, seguindo uma rotina de análise.

Para cada pista analisada foram extraídas duas leituras em pontos diferentes, visando à identificação da homogeneidade do comportamento de dureza ao longo de toda superfície analisada. Vale destacar a não ocorrência de leituras discrepantes na mesma pista; os valores encontrados nas duas medições em todas as pistas, sofreram pequenas variações entre si, podendo, assim, considerar para efeito de análise a média aritmética entre eles.

Todos os valores de dureza superficial, identificados neste estudo, seguiram o mesmo critério de medição definido para as análises das amostras dos ensaios de torneamento. Os valores de dureza superficiais encontrados nas amostras analisadas, tanto as dos corpos de prova submetidos ao processo de torneamento, quanto aos submetidos aos demais processos são apresentados numa seqüência

de quadros, cujos resultados estão divididos por tipo de processo de usinagem e material do CP utilizado.

Os valores obtidos nestas análises de dureza superficial foram analisados posteriormente de maneira criteriosa, ensaio por ensaio, com o propósito de identificar, dentre os parâmetros de corte utilizados nos ensaios, o parâmetro de corte que promoveu as maiores interferências nos resultados dos ensaios.

4.10.3. PREPARAÇÃO METALGRÁFICA DAS AMOSTRAS

Atribui-se a esta etapa da pesquisa uma característica de fundamental importância aos seus resultados, pois ao executá-la de maneira inadequada poderá comprometer completamente o rumo da interpretação dos fenômenos, provenientes dos ensaios realizados. A preparação metalográfica foi composta por algumas fases das quais se pode citar:

1. identificação do material a ser preparado;
2. seleção do disco de corte adequado para o material;
3. verificação do “Cut-off” utilizados;
4. determinação da região a ser analisada;
5. definição da área de corte;
6. execução do corte;
7. eliminação das rebarbas provenientes do cortes;
8. definição da posição de embutimento;
9. embutimento da peça;
10. preparação da superfície a ser analisada; e
11. processo de ataque reagente da superfície para análise metalográfica.

Esta etapa do trabalho foi desenvolvida em sua totalidade nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Mecânica da FEAU/UNIMEP, onde o

pesquisador contou com o apoio dos materiais, equipamentos e auxílio técnico dos profissionais desse laboratório.

No estudo em questão, a identificação do material se tornou algo mais simples, pois já havia sido pré-definido o material dos ensaios, ou seja, um aço ABNT 4340 apenas diferindo em relação ao estado, pois estas amostras se dividem em dois grupos sendo, um grupo composto por peças confeccionadas neste material no estado beneficiado e outro grupo no estado temperado/revido; com isso, resumindo a atividade de identificação do material a uma única característica determinante, suas durezas.

Após a identificação das durezas dos corpos de provas a serem preparados, que foram confeccionados em aço carbono no estado temperado/revenido, com dureza na faixa entre 53 – 55 HRC e o beneficiado a dureza numa faixa entre 15 - 19 HRC, pode-se, com estas informações, ser definido o disco de corte indicado para cada grupo de corpos de prova.

A determinação correta do disco de corte permite a execução adequada de uma das grandes preocupações, se não a maior delas, que é o momento de corte dos corpos de prova para confecção das amostras. Esta seleção, feita adequadamente, permite uma redução significativa nos esforços de cortes, reduzindo a inserção de novas variáveis, as quais exercem interferências na interpretação dos fenômenos pós-usinagem.

Após a seleção adequada do disco de corte e uma averiguação de alguns itens no “Cut-off” como, principalmente, o nível e qualidade do fluido lubrificante do sistema de refrigeração da máquina, se faz necessário, pois a não existência ou a existência com alguma irregularidade comprometeria todo o resultado do corte.

Passa-se, então, à etapa de identificação de quais regiões dos corpos de prova são de interesse para a análise, uma vez que no presente estudo a região de interesse sempre está focada na superfície e nas regiões próximas a ela (subsuperfície), independentes do processo de usinagem, a que foi submetido o CP em questão.

Para os corpos de prova submetidos aos ensaios de processos de torneamento e de retificação (cilíndrica), tem-se uma similaridade no formato das amostras a serem extraídas dos corpos de prova, tendo em vista algumas particularidades destes processos; já nos ensaios de fresamento e furação suas amostras assumem algumas facilidades na preparação, sentidas ao longo do desenvolvimento das análises. O formato das referidas amostras são apresentados nas Figura 20.

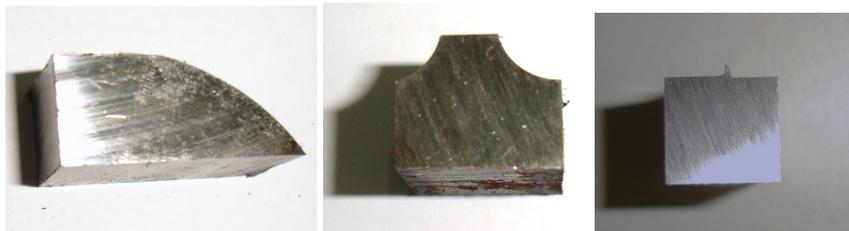


FIGURA 20: FORMATO DAS AMOSTRAS DOS ENSAIOS

Realizados os cortes nas amostras, elas são submetidas a um lixamento manual, realizado com o intuito de eliminar possíveis rebarbas das amostras, que possam comprometer o seu perfeito assentamento na base do dispositivo da máquina de embutimento, que possa dificultar o processo de preparação das amostras. As imagens apresentadas na Figura 20, além de demonstrarem o formato

de cada uma das amostras, também se demonstram nestas imagens, o posicionamento delas ao serem embutidas.

O tipo de embutimento das amostras analisadas foi feito em baquelite, numa embutidora da marca Panambra – *Struers*, modelo *Tempopress 2*, seguindo procedimentos de tempo e pressão recomendados pelo fabricante em manual de operações da máquina.

Isto, para a obtenção de algumas características desejadas nas amostras, como a de facilitar sua preparação e melhorar a nitidez das imagens obtidas nas bordas das amostras a serem analisadas (interface entre peça e baquelite), região das amostras de maior interesse, para o presente trabalho.

Além das recomendações do fabricante, sobre o processo de embutimento das amostras, foram seguidas algumas recomendações de profissionais do laboratório, baseadas em conhecimentos técnicos adquiridos ao longo de suas experiências profissionais. Dentre essas recomendações podem ser citadas duas de maior relevância:

✓ adoção de duas cores de baquelites (marrom e preta); a cor marrom foi utilizada apenas na superfície superior da amostra (região a ser observada) buscando maior compactação do baquelite e maior aderência da baquelite na superfície a ser analisada, eliminando, desta forma, o aparecimento de possíveis lacunas na interface peça-baquelite. Esta lacuna gera na amostra após ataque a formação de “borda de ataque”, fator que quando ocorrido, prejudica a análise e identificação de possíveis fenômenos ocorridos na amostra em questão. A Figura 21 mostra a ocorrência de uma borda de ataque.

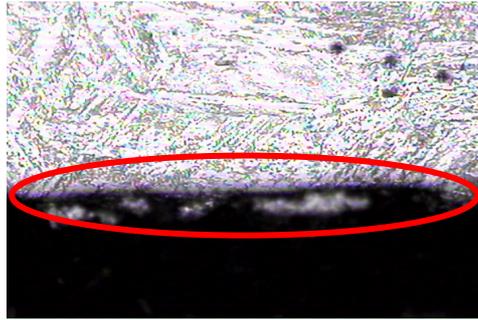


FIGURA 21: BORDA DE ATAQUE

✓ adição de pequenas esferas metálicas (granalhas) inseridas na embutidora antes da colocação do pó de baquelite. Estas esferas ficam depositadas na superfície de análise das amostras, proporcionando ao baquelite um acréscimo de dureza, fator que aumenta sua resistência ao desgaste provocado pelas lixas de preparação, melhorando, assim, o paralelismo necessário da superfície a ser analisada e garantindo maior perfeição na região de interesse no momento de aquisição das imagens.

Na Figura 22 apresenta-se, em detalhe, as pequenas esferas metálicas adicionadas ao baquelite das amostras analisadas, e um exemplo de amostra embutida conforme citado, onde estas esferas aparecem como pequenos pontos metálicos ao redor da amostra analisada.



FIGURA 22: PEQUENAS ESFERAS METÁLICAS.

Outro benefício importante, atingido com a adição destas pequenas esferas metálicas, encontra-se no sentido de que através delas pode-se identificar a

quantidade de material removido das amostras, durante o processo de preparação. Esta informação é muito importante para as análises, pois ela traz a certeza de que a região analisada está isenta de alterações proporcionadas pelo corte, no início do processo de preparação das amostras, o que é conseguido com base no desgaste promovido nas amostras com a preparação.

Na Figura 23 apresenta-se a medição da secção transversal, de uma das esferas metálicas encontradas na baquelite das amostras, após o término da preparação metalográfica desta.

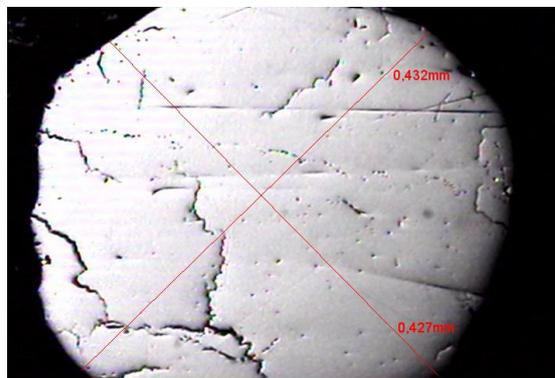


FIGURA 23: IMAGEM DE MEDIÇÃO DE SECÇÃO DA ESFERA METÁLICA

As esferas metálicas, inseridas nas amostras possuem diâmetro médio, que varia em torno de 0,075 mm até 0,08 mm. Para melhor interpretação de como determinar a profundidade, atingida pela remoção do material (desgaste), ao longo da preparação das amostras, a Figura 24, apresenta o esquema utilizado para identificação da profundidade atingida na preparação.

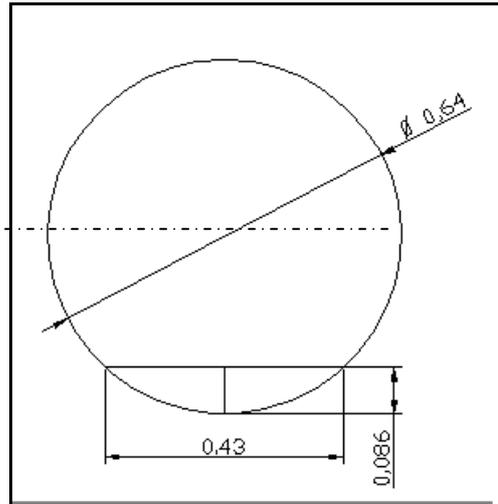


FIGURA 24: DETERMINAÇÃO DA PROFUNDIDADE ATINGIDA

A Figura 24 demonstra, em detalhe, como podem ser determinadas as profundidades atingidas pelo processo de preparação das amostras; uma vez conhecido o diâmetro inicial das esferas e o diâmetro final da seção transversal, destas esferas embutidas no baquelite, ao se relacionar estas duas medidas, facilmente se chega a tal medida de profundidade desejada.

Destaca-se o fato da importância de se observar o comportamento desta seção ao longo do processo de preparação, evitando leituras equivocadas da profundidade, pois estas medidas devem ser divididas em dois grupos de medidas, sendo as medidas antes da linha de centro das esferas e outra após a linha de centro das esferas.

Dando continuidade à preparação metalográfica das amostras, após a fase de embutimento, dá-se início ao processo de polimento da superfície a ser analisada, o qual é marcado pela fase de lixamento, polimento e ataque.

Ao finalizar o lixamento da última lixa a amostra está apta para receber o polimento, que é realizado em uma politriz, similar a utilizada no lixamento, tendo no lugar das lixas um feltro confeccionado em uma espécie de pano aveludado o qual é umedecido em alumina (granulação de 1 micra). O polimento da peça se dá até o

ponto em que não se observa mais nenhuma ocorrência de riscos que, para melhor averiguação, deve-se utilizar um microscópio metalográfico em pequeno aumento com a peça sem ataque, o que facilita a identificação de ponto ótimo para a finalização do processo de polimento. Para a realização do processo de polimento foram utilizados: uma politriz da marca Arotec e alumina 4.

Finalizado o processo de polimento a amostra deve ser lavada objetivando a eliminação de todas as impurezas e possíveis resíduos existentes na mesma; após esta lavagem esta amostra deve ser completamente seca, utilizando, no início do processo de secagem, um jato de álcool, facilitando a remoção da umidade presente na amostras, prevenindo o surgimento de oxidações na superfície da amostra; com a amostra seca, segue-se para o momento do ataque.

O ataque deve ser realizado o mais próximo possível do momento da realização das análises metalográficas, pois podem ocorrer oxidações que interfiram na interpretação dos fenômenos esperados nas amostras. O ataque é realizado na amostra tendo como base Nital 2%, no qual as amostras ficam expostas por cerca de 10 segundos, (observando as alterações em sua coloração). Passado o referido tempo deve-se remover todo o resíduo de Nital da superfície da amostra, com uma série de jatos de álcool disparados sobre a superfície da amostra e, na seqüência, a amostra deve ser completamente seca com auxílio de “secador de cabelos”, procurando direcionar os jatos de ar quente, por algum tempo, na superfície a ser analisada, priorizando a região de interface peça-baquelite; após tal processo a peça esta preparada, ou seja, liberada para ser analisada metalograficamente.

Após atacadas, as amostras devem ter suas micro-estruturas fotografadas para posterior análise, sendo que o tempo entre o ataque e a aquisição das imagens

deve ser o menor possível objetivando as menores interferências e alterações no resultado das análises.

4.10.4. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE DE MICRODUREZA

A análise de microdureza teve seu início marcado na constatação da distância necessária à ser percorrida pelo penetrador, ao longo da superfície e subsuperfície das amostras a serem analisadas, pois tal distância representa a camada que pode ter sofrido alterações durante o processo de usinagem a que foi submetida.

Esta distância é de suma importância para este tipo de análise, pois após sua identificação, podem ser dimensionados os parâmetros de medições para o bom andamento da análise.

Parâmetros como distância entre as impressões, quantidades de impressões a serem realizadas, definição da carga (HV 0,2) a ser aplicada, identificação da dureza de base da amostra, dentre outras particularidades.

Esta distância pode ser definida tanto pelos recursos de aquisição e análise de imagem via recursos computacionais (imagem A - medição da camada), como por meio da realização de medições simultâneas de microdurezas ao longo da amostra até atingir a região de estabilização dureza (imagem B - região não afetada). Estes dois critérios podem ser observados nas imagens da Figura 25.

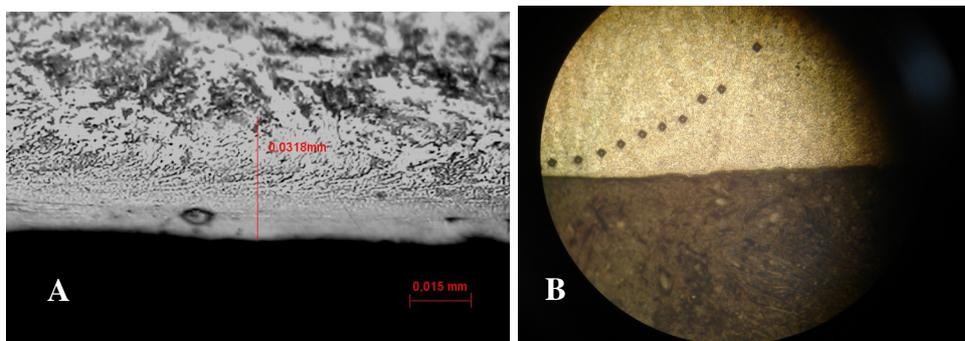


FIGURA 25: DEFINIÇÃO DO PERCURSO DO PENETRADOR

A identificação desta distância no trabalho teve de ser realizada pelos dois métodos devido à ocorrência, em alguns casos, de camadas muito reduzidas, que limitavam a utilização do recurso de imagem, ou seja, alterações impostas nas amostras, ligadas a mudanças de comportamentos físicos sem alterar drasticamente sua microestrutura.

Na Figura 26, pode ser visualizado o momento em que é ajustado o foco de observação da amostra (esquerda) e o posicionamento correto do local da impressão; este ajuste de foco já garante o afastamento correto do penetrador em relação às amostras. Na imagem da direita pode ser visualizado o momento de aplicação da carga. O posicionamento do penetrador na amostra é garantido pelos manípulos graduados em escala centesimal (imagem esquerda).

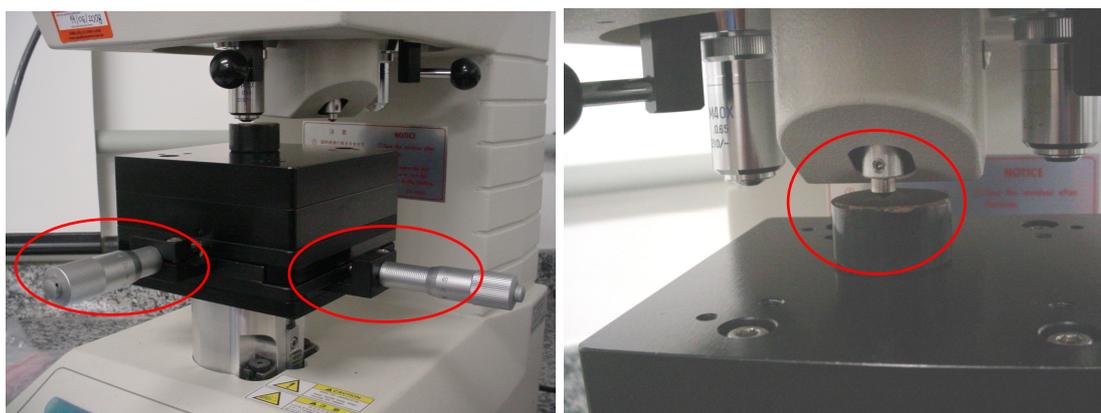


FIGURA 26: POSICIONAMENTO DA IMPRESSÃO NA AMOSTRA

Todas as análises realizadas seguiram procedimentos experimentais definidos pelo fabricante e regulamentos do próprio laboratório, além disto, alguns cuidados foram tomados, como assegurar o perfeito assentamento da amostra na base do microdurômetro e a aplicação da mesma carga para todas as amostras, dentre outras.

A Figura 27 apresenta, de modo detalhado, o momento da medição das diagonais da impressão (L1 e L2) para posterior definição da microdureza

encontrada na amostra analisada; nesta mesma figura na imagem à direita temos o painel do microdurômetro utilizado, onde podem ser observadas algumas informações pertinentes a esta análise como o valor de L1 (18,04 mícron) e L2 (18,19 mícron), o valor da carga aplicada HV0.2 (200g) e o valor da microdureza em HV e HRC (565 e 53,2 respectivamente).

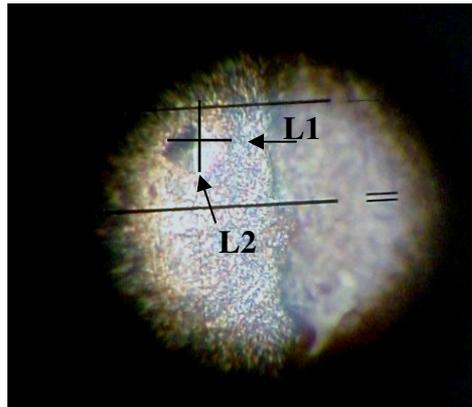


FIGURA 27: DETALHE DE MEDIÇÃO DA MICRODUREZA

Foi adotado, para a realização das análises de microdurezas, um percurso de medição curvo (imagem B), podendo, desta forma, identificar um maior número de pontos de análise, ao longo da camada de interesse, o que não seria possível se o percurso assumido pelo penetrador fosse uma linha reta (imagem A). As coordenadas utilizadas para realização do percurso das impressões da análise de microdureza foram marcadas pelo deslocamento da mesa em X e Y sendo que, para cada 0,01 mm de deslocamento no eixo de X era realizado um deslocamento de 0,03 mm no eixo Y, formando, assim, o perfil observado na Figura 28– B.

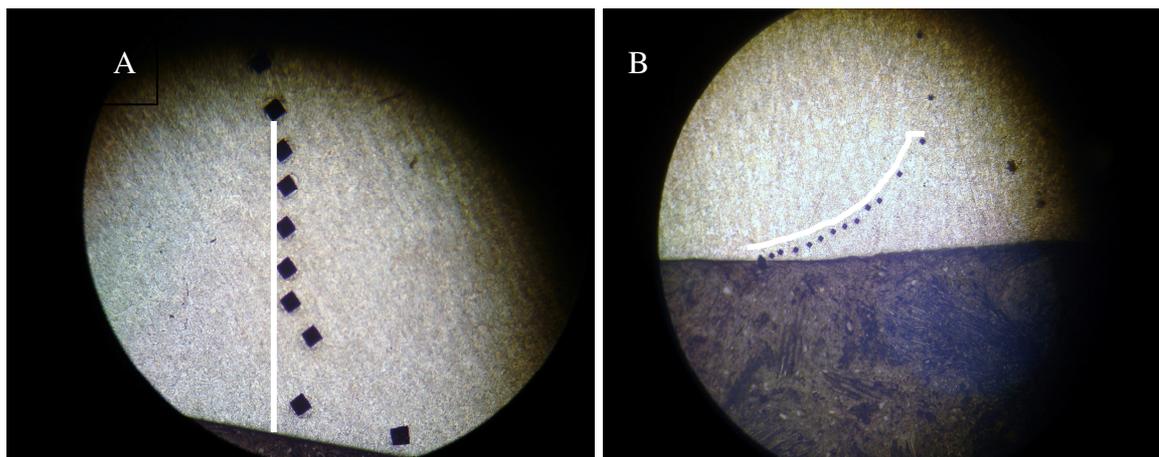


FIGURA 28: EXEMPLOS DE MEDIÇÕES DA MICRODUREZA

Após as devidas constatações, foram definidas como quantidade padrão de medições para as análises de microdureza, 7 medições realizadas ao longo das superfícies e subsuperfícies analisadas; os valores destas medições são apresentados na seqüência do texto.

Os valores obtidos na análise de microdureza Vickers foram obtidos por meio de análise executada a cada 0,01mm de profundidade, da superfície em direção ao centro das amostras, e em análise são comparadas a medida da microdureza encontrada no núcleo das amostras.

4.10.5. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE METALOGRAFICA E DA CAC

As análises metalográficas e da CAC foram realizadas de maneira simultânea e logo após a execução do ataque da superfície a ser analisada. Estas análises estão diretamente ligadas entre si, ou seja, as análises estão relacionadas a identificação de ocorrência de alterações na microestrutura da amostra após os ensaios.

A análise metalográfica baseia-se na identificação de alterações na microestrutura do material (transformação de fase), alterações aparentes na superfície analisada, variação de coloração ao longo da amostra. Enquanto que na análise da

CAC realiza-se a quantificação de tais alterações, ou seja, nesta análise ocorre a medição da profundidade destas camadas.

O bom resultado destas análises está centrado na realização adequada de processamento de imagem, resolução dos equipamentos utilizados, dentre outras características ligadas à projeção de imagem da superfície e subsuperfície das amostras analisadas.

O ataque das superfícies deve ser feito de maneira muito cautelosa, pois nele estão relacionadas algumas particularidades como a perfeita revelação da estrutura apresentada e a intensidade do ataque (tempo de exposição da amostra em nital), que deve ser muito bem controlado para não interferir nos resultados das análises.

O excesso da exposição pode queimar a amostra, deixando-a totalmente escurecida impossibilitando a observação das diferentes fases encontradas; este fato obriga o retorno da amostra a fases anteriores do processo de preparação tendo de ser novamente polida para poder ser atacada. Contudo, o ataque insuficiente também não é bem vindo, pois não consegue visualizar, de maneira nítida, as alterações nem as possíveis alterações de fase.

Outro cuidado a ser tomado, no sentido de garantir a qualidade das análises, está na busca do perfeito posicionamento da amostra em relação ao microscópio mantendo o paralelismo entre a superfície analisada e a base do microscópio, o que se consegue ao apoiar a amostra sobre massas modeladoras.

Para a interpretação de possíveis fenômenos ocorridos do material e os possíveis responsáveis por tais ocorrências, nesta etapa da análise é de fundamental importância o suporte técnico para sanar possíveis dúvidas relacionadas a correta interpretação dos fenômenos analisados.

O perfeito ajuste de ampliação da imagem, proporcionado pelo conjunto de aquisição de imagem metalográfica, microcópico-computador-suporte-câmera, monta um padrão único de ampliação para a realização de todas as aquisições de imagens envolvidas nestas análises, não só das amostras como também das escalas utilizadas principalmente na análise de CAC.

Este conjunto é formado por um microscópio metalográfico, uma câmera de alta resolução, suporte específico para acoplamento da câmera ao microscópio e o computador com software, para aquisição e análise de imagem, instalado. Este suporte possui um mecanismo de *zoom* (ampliação), para o qual deve ser definida uma posição padrão e utilizá-la para todas as imagens desenvolvidas.

A Figura 29 apresenta uma aplicação de um processo de calibração do software, por meio de uma imagem, de uma escala graduada, obtida na posição padrão mencionada, para posterior análise da CAC. Nesta mesma figura, ao fundo, pode ser vista a imagem de uma amostra com a medida de sua camada conhecida, utilizada para confrontar a exatidão da calibração.

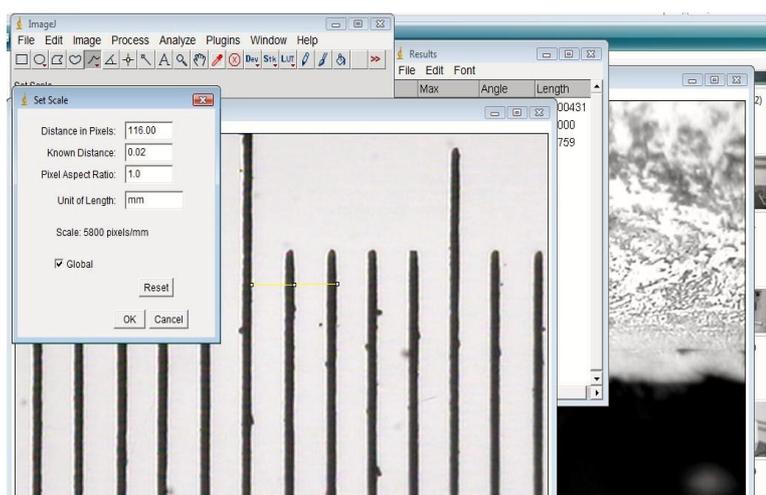


FIGURA 29: CALIBRAÇÃO DO SOFTWARE

Na análise metalográfica busca-se a identificação e interpretação de fenômenos ocorridos na superfície e subsuperfície das amostras submetidas os

ensaios de usinagem. Na Figura 30 são apresentadas duas análises metalográficas desenvolvidas em amostras de diferentes ensaios. Na imagem A, desta figura, apresenta-se uma amostra do ensaio FUBSF, com alguns exemplos de alterações ocorridas após ensaio, dentre elas a formação da CAC e a re-orientação da microestrutura deste material. A imagem B traz uma análise metalográfica de uma amostra do ensaio TBCF, onde pode ser percebida a formação de uma CAC menos evidente e a re-orientação da microestrutura.

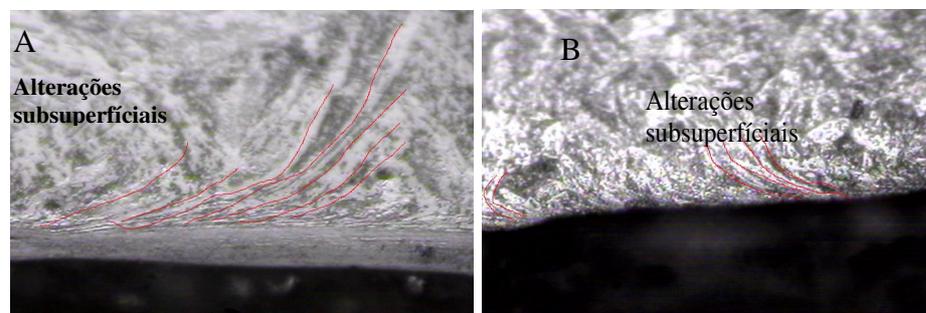


FIGURA 30: ANÁLISE METALOGRÁFICA

A Figura 31 traz um exemplo de análise da CAC em que é quantificada a profundidade da alteração ocorrida na integridade desta superfície analisada.

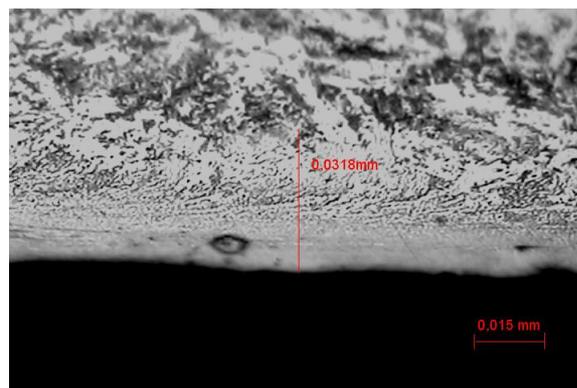


FIGURA 31: ANÁLISE DA CAC

Os resultados obtidos com análise da CAC, entre os ensaios desenvolvidos, encontram-se organizados em três quadros, divididos nos ensaios TBCF/TBSF, nos ensaios TTCF/TTSF e nos resultados dos ensaios RTCF/FBSF/FUCF.

Estes resultados serão mais bem interpretados e correlacionados com os parâmetros de corte envolvidos buscando a identificação da influência de cada um destes e destacando o parâmetro de maior relevância nas alterações ocorridas, ligadas a formação da CAC e alterações metalográficas.

4.10.6. DESCRIÇÃO DA ANÁLISE D TENSÃO RESIDUAL

As análises de tensões residuais foram realizadas tomando como base a identificação da diferença entre o estado de tensão encontrado no núcleo da peça analisada (condição inicial de tensão) e o estado de tensão encontrado em regiões próximas à superfície usinada, identificando, desta forma, a ocorrência de alterações nas amostras analisadas, após os ensaios.

A Figura 32 apresenta a imagem de amostras que tiveram o seu comportamento de tensão residual analisado, para efeito visual, a posição de medição de tensão nas amostras dos ensaios de torneamento e de retificação foi apresentada numa única imagem e outra imagem para representar as amostras do ensaio de furação e de fresamento. Nestas imagens nota-se o desenvolvimento da análise de tensão residual sendo realizada em dois momentos, sendo uma localizada distante da região de corte **(a)** e outra o mais próximo possível da superfície de corte (interface entre baquelite/amostra) **(b)**.

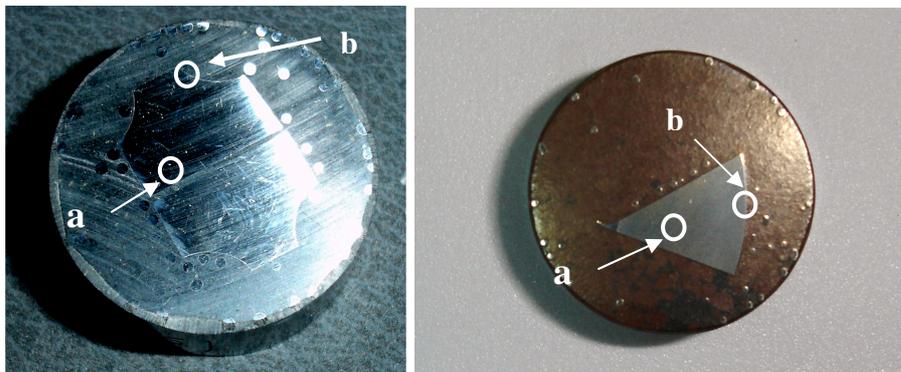


FIGURA 32: LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ANÁLISE DE TENSÃO

Esta análise foi desenvolvida numa empresa do setor automobilístico (Eaton). O equipamento utilizado para análise desenvolve a medição de tensão por difração de Raio-X que, em função da baixa disponibilidade de tempo, equipamento com alta taxa de utilização, não foi possível de ser analisado 100% das amostras ensaiadas, sendo selecionada uma amostragem equivalente a 40% deste total (60 amostras num total de 120 medições).

A seleção e escolha destas amostras foram realizadas, objetivando a formação de grupos de amostras, associando-as em relação ao tipo de ensaio utilizado (material e processo de usinagem) e algumas similaridades entre os parâmetros de cortes utilizados.

Os valores de tensões residuais obtidos com esta análise estão apresentados em grupos já prevendo a junção de amostras com algumas similaridades processuais; estes dados estão estruturados em quadros, os quais são apresentados ao longo do texto.

Os valores medidos do estado de tensão encontrado na superfície das amostras analisadas, nos ensaios TBSF e TBCF, amostras estas que estão agrupadas por processo de torneamento em aço no estado beneficiado e pelos parâmetros de corte do processo (a_p , V_c e f_n).

Os resultados, obtidos com a análise de tensão residual, serão mais bem discutidos e analisados, em busca de pontos de correlação entre as variações de medidas de tensão residual com os parâmetros de corte utilizados, objetivando identificar o parâmetro de maior interferência nas variáveis de saída.

5. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE INTEGRIDADE

No decorrer desta etapa do trabalho são apresentados os resultados das análises desenvolvidas nos corpos de prova, com o objetivo de desenvolver um levantamento das condições superficiais e subsuperficiais dos materiais submetidos a ensaios de usinagem.

5.1. ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Pretende-se neste texto relatar, de forma detalhada, o comportamento assumido pela rugosidade superficial, nas superfícies dos corpos de prova confeccionados nos ensaiados da pesquisa.

Os resultados das rugosidades superficiais foram agrupados em função de um dos parâmetros estudados.

No caso das velocidades de corte (V_c1 , V_c2 e V_c3), a escolha pelo agrupamento em função da V_c ocorreu devido à percepção da pequena interferência promovida por tal parâmetro no comportamento do fenômeno analisado (R_a). Tal interferência foi constatada em gráficos de estudos preliminares, como pode ser visto na Figura 33, que apresenta um dos gráficos utilizados para auxiliar nestas análises.

Neste gráfico são apresentados 3 grupos de amostras formados cada um deles por nove pistas. Esta primeira divisão é feita por grupos de amostras que utilizaram a mesma VC ($V_c 1$, $V_c 2$ e $V_c 3$) respectivamente, dentro de cada grupo com nove amostras, tem-se a divisão por profundidade de corte (a_p1 , a_p2 e a_p3). Esta divisão por A_p ocorre a cada três amostras; já o f_n é variado de amostra por

amostra seqüencialmente, sendo f_{n1} , f_{n2} e f_{n3} sucessivamente até o término das 27 amostras analisadas neste ensaio.

O gráfico apresentado na Figura 33 ajudou na percepção do grau de interferência dos parâmetros analisados e na orientação de formação de grupos para se atingir as melhores respostas nas análises desenvolvidas.

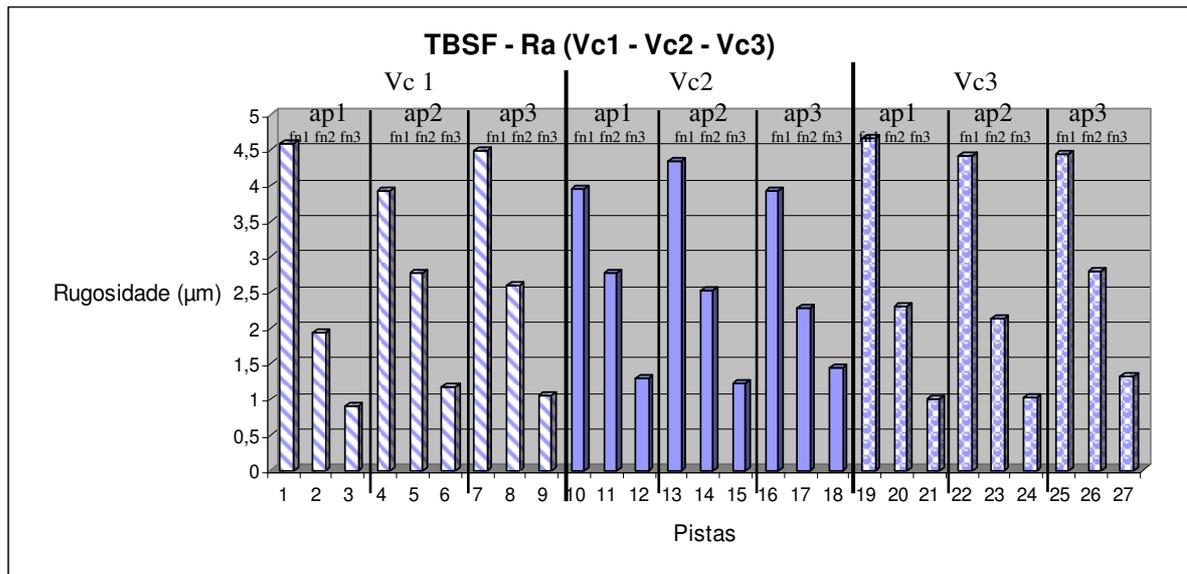


FIGURA 33: GRÁFICO PRELIMINAR DE ANÁLISE COM AGRUPAMENTO POR V_c

Para melhor compreensão da baixa influência da V_c no comportamento de Ra neste ensaio, e reforçar o motivo de escolha deste parâmetro, no gráfico da Figura 34 tem-se um arranjo dos dados de maneira diferente que a maneira apresentada na figura anterior; nesta figura o agrupamento maior (nove amostras) é feito em função do f_{n1} , f_{n2} e f_{n3} respectivamente.

Com os dados das análises desenvolvidas sobre a rugosidade superficial (Ra) das amostras dos sete ensaios, estes dados foram estruturados graficamente de forma a auxiliar na detecção de possíveis tendências comportamentais assumidas pelas amostras.

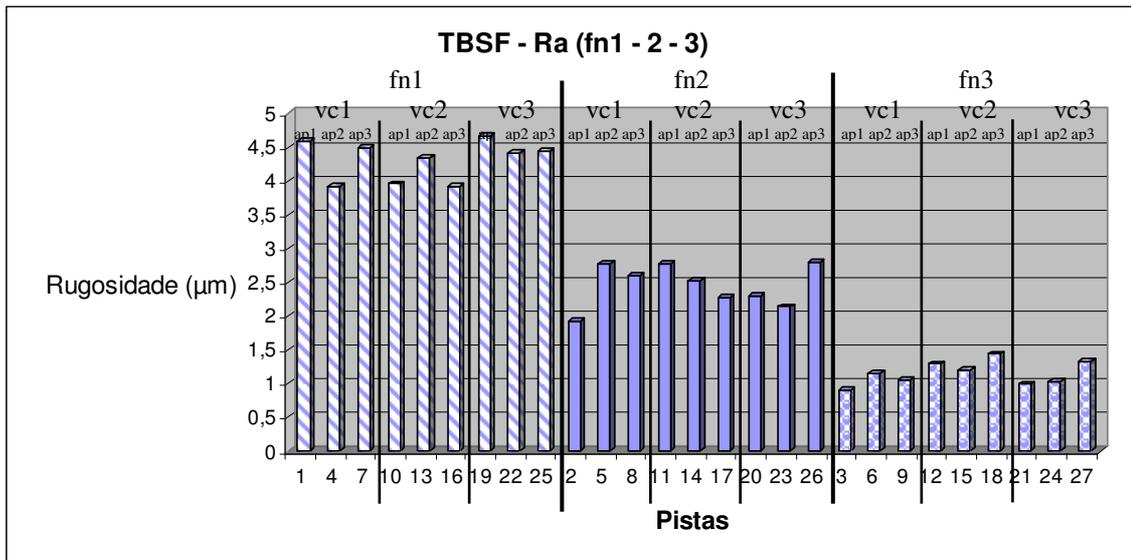


FIGURA 34: GRÁFICO PRELIMINAR DE ANÁLISE COM AGRUPAMENTO POR FN

Estas análises foram criteriosas e detalhadas tentando confrontar e correlacionar as variáveis independentes de entrada com as variáveis dependentes de saída, visando varrer todas as possíveis combinações entre tais variáveis.

Com o resultado final destas análises chegou-se a algumas respostas no que se refere à identificação dos parâmetros que mais contribuíram para a obtenção das oscilações no comportamento da rugosidade superficial das amostras. Alguns gráficos se tornaram verdadeiras ferramentas que contribuíram de maneira decisiva para tais interpretações. Seguindo uma lógica de análise por ensaios teremos uma seqüência demonstrando, de maneira geral, como se comportou esta variável de saída entre os ensaios.

5.1.1. ANÁLISE DE RA PROCESSO DE TORNAMENTO

Nos gráficos da Figura 35, registra-se o comportamento assumido pela rugosidade superficial, das amostras obtidas pelo ensaio TBSF; com estes gráficos fica evidente a forte influência que o parâmetro de avanço (fn) exerce sobre a

variável de saída analisada. Além desta forte influência no comportamento desta variável de saída, também é sinalizada uma espécie de tendência no comportamento, diretamente proporcional a intensidade do valor utilizado nos avanços.

Quanto maior o valor do avanço utilizado no momento de corte, maior será o valor da rugosidade superficial encontrada na superfície das amostras analisadas, ou seja, pode se afirmar que boa parte dos resultados esperados, em textura superficial, estão diretamente ligados à correta determinação dos parâmetros de avanço, para o processo de usinagem por torneamento.

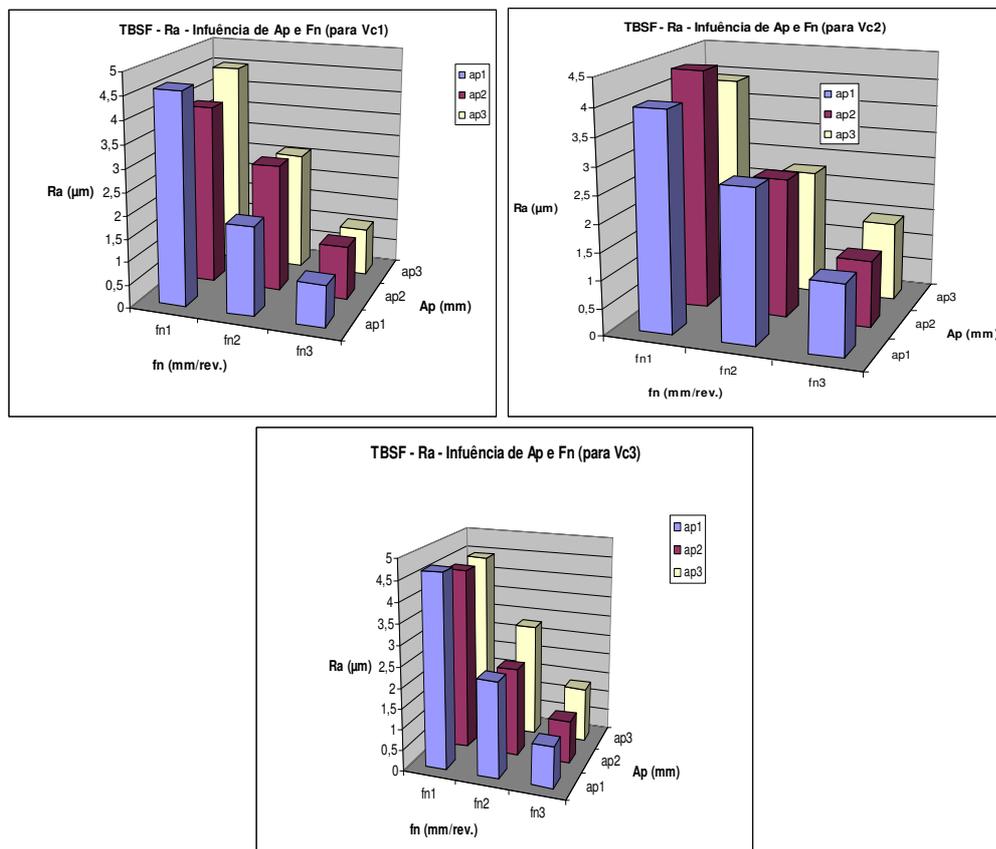


FIGURA 35: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO TBSF

Nos mesmos gráficos da Figura 35 também podem ser notados que o parâmetro de profundidade de corte (a_p) promove, de maneira menos intensa, algumas pequenas oscilações perceptíveis no comportamento da variável de saída

analisada. Estas pequenas oscilações, registradas, acabam por não assumirem nenhuma espécie de tendência. Esta variável deve ter um acompanhamento mais detalhado, principalmente quando as especificações técnicas de projeto especificarem valores de rugosidades muito reduzidos.

A V_c , como já mencionado para o ensaio TBSF, pode ser considerada como sendo o parâmetro de menor influência no comportamento da rugosidade superficial; contudo, é importante salientar que, de uma maneira geral, este parâmetro de corte não deve ser negligenciado, pois se seus valores forem determinados fora da faixa indicada de trabalho, podem adicionar ao resultado esperado na textura analisada, algumas irregularidades típicas ligadas a questões diretamente relacionadas à V_c como, por exemplo, o aparecimento de danos superficiais gerados pelo surgimento da indesejada aresta postiça de corte ou, até mesmo, pelo comportamento assumido por vibrações geradas no sistema máquina - ferramenta – dispositivo – peça (MFDP) em função da adoção deste parâmetro em condições mais otimizadas.

Já no ensaio TBCF, as amostras são submetidas a condições de usinagem muito similares aos parâmetros de corte utilizados no ensaio anterior, variando apenas a condição de refrigeração, sendo que neste ensaio utilizou-se fluído de corte em abundância. Os gráficos da Figura 36, apresentam os resultados de rugosidade superficial obtidos no ensaio TBCF.

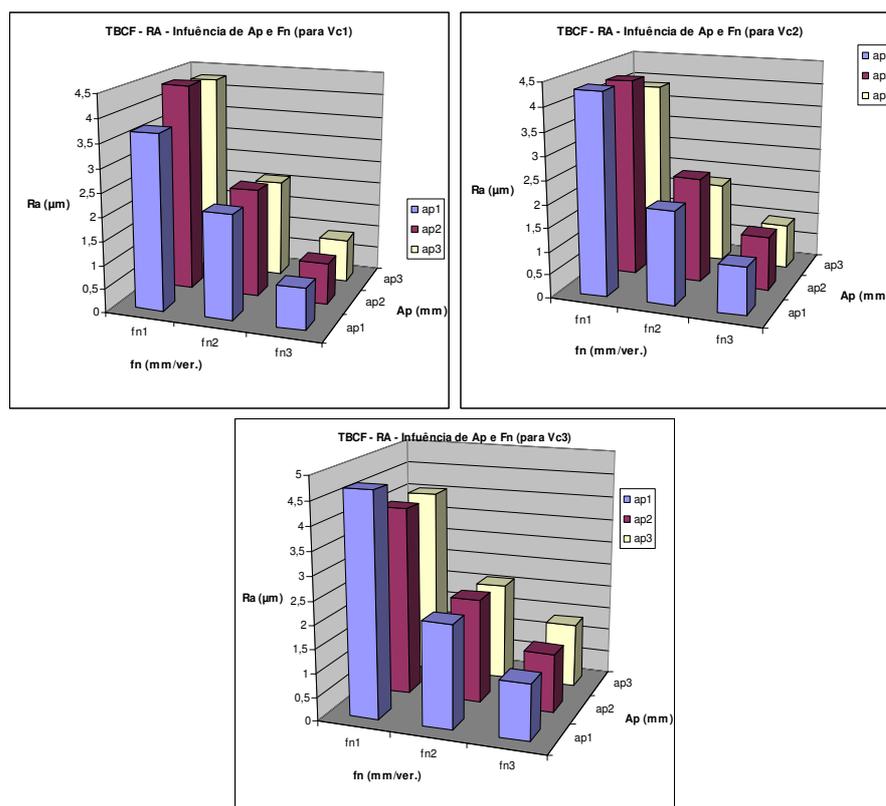


FIGURA 36: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO TBCF

O comportamento assumido pela rugosidade superficial no ensaio TBCF está representado nos gráficos da Figura 36, nos quais pode ser percebido um comportamento muito similar ao apresentado no ensaio TBSF, demonstrando em seus resultados apenas uma pequena diferença entre os dois ensaios. Tal diferença foi percebida na influência promovida pela profundidade de corte, que foi pouco maior que a apresentada nos resultados de TBSF começando, neste ensaio, a sinalizar um pequeno indicio de tendência nos resultados. Pode ser percebido em alguns conjuntos de amostras, um acréscimo dos valores encontrados à medida que se aumentam os valores da profundidade de corte, mas ainda oscilações muito pequenas e pouco perceptíveis graficamente.

Com base nos resultados das análises de rugosidade destes ensaios, pode se considerar que a influência promovida, pela utilização ou não do fluído de corte é praticamente imperceptível e muito pouco influencia no comportamento de

rugosidade superficial das amostras submetidas aos ensaios de torneamento, principalmente em situações onde as condições de usinagem utilizadas se assemelham com as condições aqui utilizadas.

Nos gráficos da Figura 37 pode ser visto o comportamento assumido pela rugosidade superficial das amostras submetidas ao ensaio TTSF; neste ensaio nota-se que, assim como nos ensaios TBSF e TBCF, o parâmetro de avanço f_n promove uma notável influência nos resultados obtidos.

Os valores plotados nestes gráficos do ensaio TTSF, também sinalizam para um comportamento tendencioso, da relação entre os valores da rugosidade superficial das amostras com os valores dos parâmetros de avanço de corte (f_n).

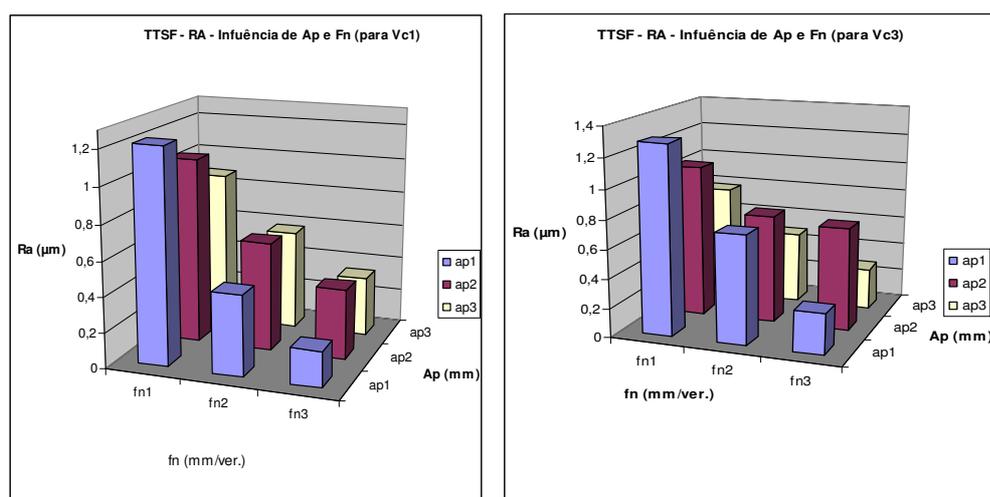


FIGURA 37: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO TTSF

No ensaio TTSF o comportamento apresentado pelos valores das rugosidades superficiais se assemelha muito com o comportamento apresentado no ensaio TTSF como se pode ver nos gráficos da Figura 38.

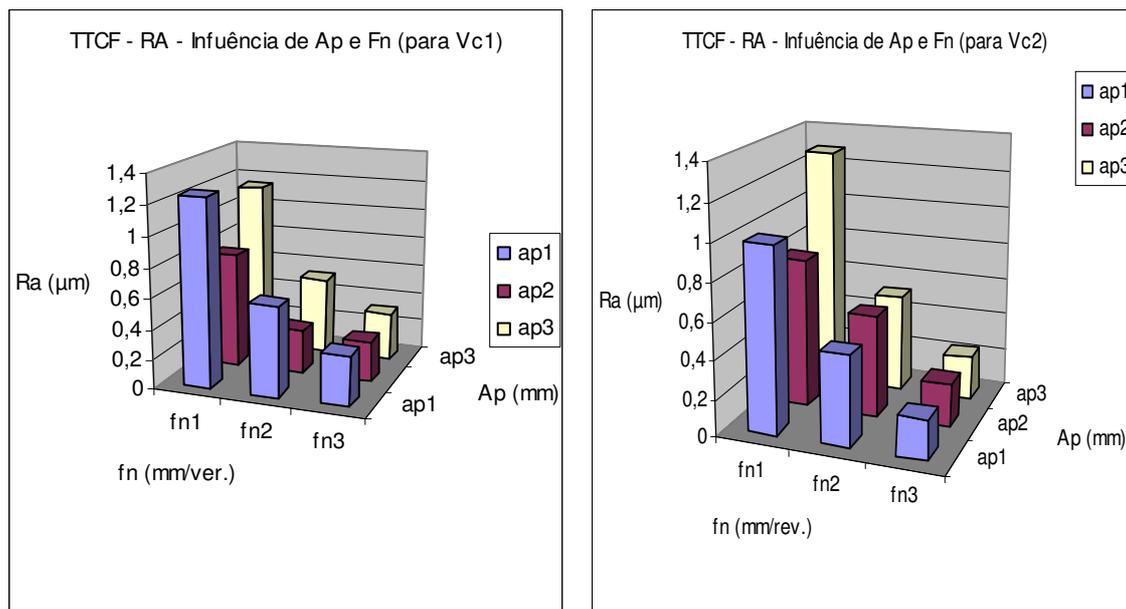


FIGURA 38: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO TTSF

No ensaio TTCF a profundidade de corte gera influências percebidas mais de maneira aleatória, não sinalizando, desta forma, nenhum tipo de tendência sinalizado entre a profundidade de corte e a rugosidade superficial das amostras.

Pode-se perceber, igualmente, uma influência muito pequena, provocada pela adição do fluido de corte, em relação ao comportamento da rugosidade superficial, ao se confrontar os resultados dos gráficos do ensaio TTSF com os gráficos do ensaio TTCF, uma vez que todos os parâmetros de corte (variáveis independentes de entrada) utilizados são os mesmos para os dois ensaios.

Os resultados de rugosidade superficial apresentado pelos ensaios TTSF e TTCF, demonstram uma pequena faixa de variação apresentada entre seus valores de máximo ($Ra=1,29\mu\text{m}$ para a_p 3, f_n 1 e V_c 2) e mínimo ($Ra=0,16\mu\text{m}$ para a_p 2, f_n 3 e V_c 3) obtidos na análise, ou seja, temos em Ra , uma diferença entre este dois extremos de apenas $1,11\mu\text{m}$, enquanto que nos ensaios anteriores (TBSF e TBCF), com a utilização do material no estado beneficiado, esta diferença pula para algo em torno de $3,83\mu\text{m}$ ($Ra_{\text{Max}}= 4,7\mu\text{m}$ para a_p 1, f_n 1 e V_c 3 / $Ra_{\text{Min}}= 0,87\mu\text{m}$ para a_p 1,

f_n3 e $V_c 1$). Esta diferença possui fortes indícios de estar associada à mudança no estado do material, mas podem ser constatadas, ainda, algumas influências proporcionadas pelos parâmetros de corte utilizados neste ensaio, como demonstrado nos valores apresentados no Quadro 10.

	$a_p 3/f_n3$	$a_p 3/f_n3$	$a_p 2/f_n1$	$a_p 2/f_n1$
	TBSF	TBCF	TTSF	TTBF
$V_c 1$	0,93	1,05	1,06	0,77
$V_c 2$	0,96	1,44	0,85	0,80
$V_c 3$	1,36	1,33	1,04	0,98
Média	1,08	1,27	0,98	0,85

QUADRO 10: RUGOSIDADE SUPERFICIAL: AMOSTRAS COM PARÂMETROS DE CORTE SIMILARES

O Quadro 10 apresenta valores de amostras que compartilham os mesmos parâmetros de corte. Desta maneira, consegue-se identificar a influência no comportamento da rugosidade superficial, proporcionada pela alteração do estado do material. Estas alterações podem ser reveladas pela diferença entre as médias dos valores das rugosidades apresentadas para cada ensaio, que também podem ser vistas no final do mesmo quadro.

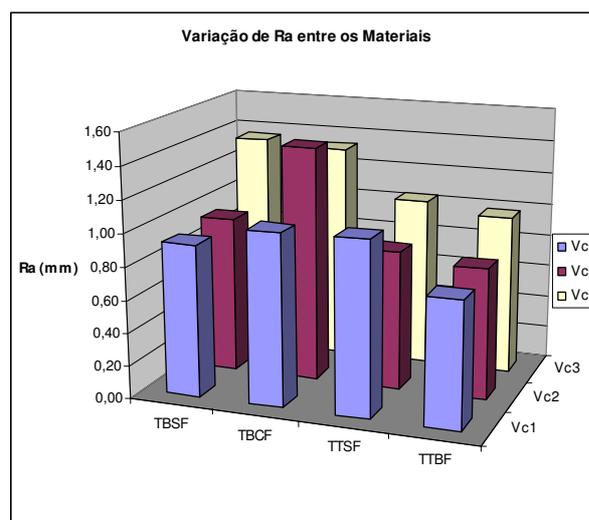


FIGURA 39: RELAÇÃO ENTRE O RESULTADO DOS ENSAIOS

No gráfico da Figura 39 pode ser percebida a influência que a mudança de material promoveu no resultado destes ensaios, onde se observa uma alteração

considerável no comportamento da rugosidade superficial nestes ensaios, sinalizando um aumento nos valores de rugosidade superficial das amostras confeccionadas em material no estado beneficiado. Neste gráfico foram agrupados valores de amostra de forma a manter constantes os mesmos valores de a_p e f_n , e ainda orientando estes valores em função da V_c , buscando destacar unicamente a influência percebida pela alteração do estado do material.

Fica evidente, após estudos realizados nos resultados da análise de rugosidade superficial dos ensaios de torneamento, que o parâmetro de maior influência no comportamento da rugosidade superficial é o avanço (f_n), que além de promover alterações significativas, apresenta uma certa tendência diretamente proporcional a intensidade de seus valores.

Já a profundidade de corte (a_p) promove influência nos resultados de maneira menos intensa, provocando em alguns conjuntos de amostras indícios de tendência, contudo, nada que possa ser considerado como, de fato, uma tendência de comportamento.

A V_c nestes ensaios não se mostrou como sendo um parâmetro de grande influência na formação de comportamento, nos valores de rugosidade superficial analisados entre os 4 ensaios do processo de torneamento.

5.1.2. ANÁLISE DE RA PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Os resultados obtidos na análise de rugosidade do ensaio RTCF, são apresentados nos gráficos da Figura 40, nos quais podem ser vistos os valores de dois dos três grupos de ensaio analisados.

Estes gráficos sinalizam um comportamento marcado por pequenas oscilações entre os valores de rugosidade superficial obtidos nos ensaios de retificação, este comportamento se assemelha muito ao percebido nos ensaios de

torneamento em que o material utilizado encontrava-se no estado temperado/revenido, assim como o material utilizado nos ensaios de retificação.

Os valores de rugosidade superficial apresentados pelo ensaio de retificação, de uma maneira geral, foram valores pequenos de R_a , principalmente se comparados aos conseguidos nos ensaios de torneamento do mesmo material.

Como base para esta comparação pode-se remeter, novamente, à faixa de variação entre os valores de máximo ($R_{a\text{ Max}} = 0,56\text{mm}$ para a_p 1, f_n 1 e V_c 3) e mínimo ($R_{a\text{ Min}} = 0,21\text{mm}$ para a_p 1, f_n 3 e V_c 1), que para os dados analisados gira em torno de $0,35\text{mm}$; uma diferença significativa em relação à variação apresentada pelos ensaios TTSF e TTCF.

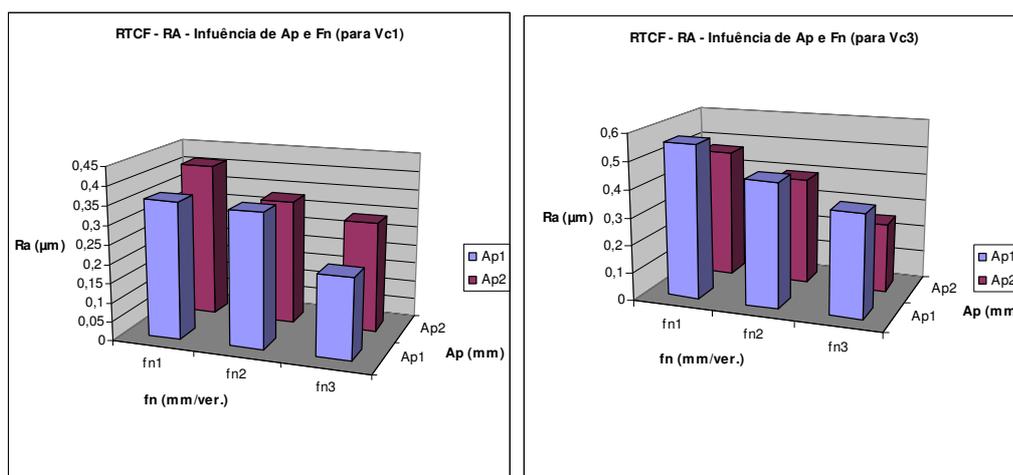


FIGURA 40: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO RTCF

Os valores obtidos nos ensaios de retificação apresentam indícios de tendência quando analisados em função do avanço (f_n), este fato indica uma influência significativa deste parâmetro sob a variável de saída aqui analisada.

O comportamento da rugosidade apresentado, quando analisado sob os parâmetros de profundidade de corte (a_p), mostra, que para o processo de retificação, este parâmetro de corte não deve ser deixado para o segundo plano, pois nos três conjuntos de amostras analisados, esta variável de entrada promoveu

algumas influências percebidas no comportamento da rugosidade analisado. Esta influência se apresenta de maneira aleatória, ou seja, não imprimindo nenhuma tendência no comporto, em função de sua variação.

A V_c no ensaio RTCF interfere muito pouco nos resultados obtidos; quando sua influência é percebida, a alteração imposta por esta variável de entrada é pouco significativa, promovendo apenas pequenas flutuações nos valores analisados; em boa parte dos casos quando se aumenta a V_c , obtêm-se valores maiores de rugosidade superficial e assim sucessivamente.

Com base nos resultados obtidos com a análise das amostras do ensaio de rugosidade pode se afirmar, que dos parâmetros utilizados neste ensaio o parâmetro de avanço (f_n) seria o parâmetro de maior influência no comportamento da rugosidade superficial, para o processo de usinagem de retificação.

5.1.3. ANÁLISE DE RA PROCESSO DE FRESAMENTO

Dentre as análises de rugosidade superficial desenvolvidas, o resultado obtido no ensaio FBSF foi o resultado que apresentou maior complexidade de interpretação, em função da não existência de um comportamento único assumido pelas superfícies das amostras analisadas. Ou seja, para os agrupamentos de amostras analisados, foram encontrados diferentes tipos de comportamentos.

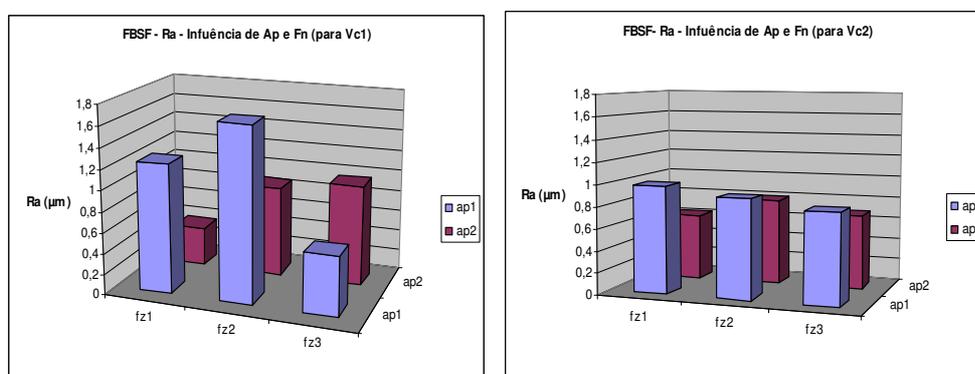


FIGURA 41: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO FBSF

Neste ensaio não foi possível identificar a ocorrência de tendência no comportamento entre as superfícies das amostras analisadas, pois ao mesmo tempo em que para alguns conjuntos de amostras, ao se aumentar o valor dos parâmetros de avanço (f_n) pode se melhorar a resposta da rugosidade superficial, em outros conjuntos de amostras, esta intervenção pode assumir sentido inverso, assumindo assim um comportamento arbitrário referente à rugosidade superficial das amostras analisadas.

Nos gráficos apresentados na Figura 41, este comportamento pode ser percebido em função da falta de uma tendência nos resultados. São apresentados os resultados de quatro conjuntos de amostras analisadas, sendo que destes quatro conjuntos analisados, pode-se encontrar 3 tipos diferentes de comportamento, reforçando a idéia de aleatoriedade dos resultados.

Embora não sinalizando nenhuma espécie de tendência no comportamento, o f_n , promove significativas oscilações no comportamento da variável analisada, mostrando-se como um item a ser controlado em busca de obtenção de melhores resultados.

Neste ensaio a_p passa a influenciar significativamente no comportamento dos resultados da variável analisada, e ainda imprime uma interferência na tendência do comportamento da variável analisada. Nesse sentido, pode-se perceber que ao se reduzir o valor da a_p , tem-se como resposta a redução dos valores medidos de R_a , fato que pode justificar uma preocupação diferenciada na determinação do parâmetro a_p nos processos de usinagem por fresamento de topo.

Neste ensaio, a V_c também promove alterações comportamentais nos valores obtidos na análise realizada, ou seja, na maior parte dos conjuntos de amostras analisados, tem-se o indício de que, ao se determinar velocidades de cortes com

valores maiores, serão obtidos menores valores de rugosidade superficial. Isto pode ser visualizado na Quadro 11 ao se comparar os valores obtidos com as diferentes velocidades de corte empregadas no ensaio.

FBSF								
V_c 1	Ra	Ra	V_c 2	Ra	Ra	V_c 3	Ra	Ra
	a_p 1	a_p 2		a_p 1	a_p 2		a_p 1	a_p 2
fz1	1,24	0,38	fz1	0,98	0,61	fz1	1,18	1,48
fz2	1,67	0,87	fz2	0,9	0,79	fz2	0,76	0,85
fz3	0,57	0,97	fz3	0,82	0,68	fz3	0,74	0,91
Média	1,16	0,74	Média	0,90	0,69	Média	0,89	1,08

QUADRO 11: REPRESENTAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE RA

Com base nas análises feitas, fica evidente que para ensaios desenvolvidos em processos de usinagem de fresamento de topo, um parâmetro muito significativo quando a variável de saída analisada for à rugosidade superficial, é o da a_p , pela tendência apresentada nos resultados; o f_n pelas oscilações significativas e aleatórias apresentadas e a V_c quando trabalhado com menores valores de velocidades de corte (V_c).

5.1.4. ANÁLISE DE RA PROCESSO DE FURAÇÃO

Os gráficos da Figura 42, representam o comportamento assumido pela rugosidade superficial em análise desenvolvida nas amostras do ensaio FUBCF.

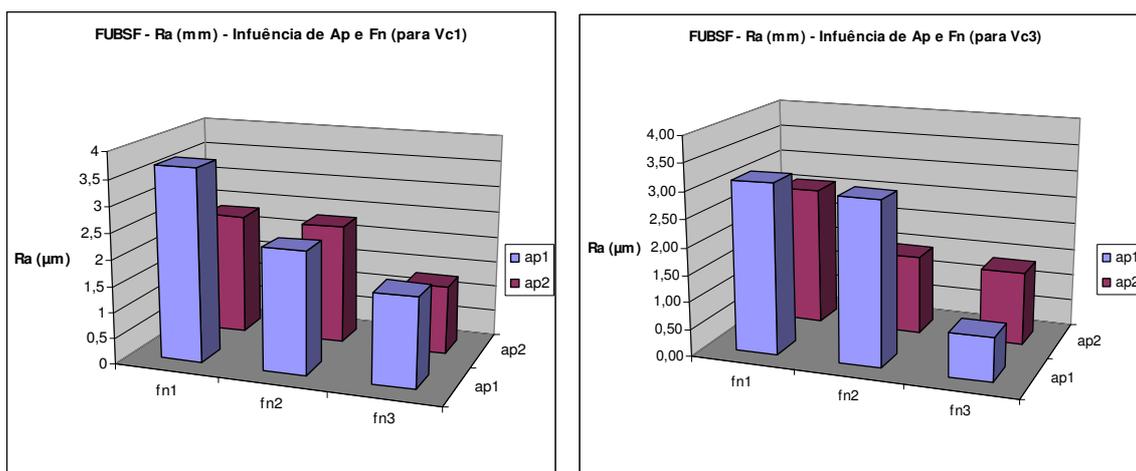


FIGURA 42: COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO FUBSF

O comportamento assumido pela rugosidade superficial no ensaio de furação é muito evidenciado pela influência imprimida pelo parâmetro de avanço (fn), sinalizando uma leve tendência atrelada a este parâmetro.

A profundidade de corte assume um comportamento estável proporcionando em algumas amostras, uma leve alteração de valores da rugosidade medida, sendo a profundidade de corte para este ensaio um parâmetro não tão preocupante, pois não está nela a responsabilidade direta de formação de tendência. Desta mesma forma, aparece a Vc interferindo minimamente no comportamento desta variável analisada.

Para melhor entendimento sobre o comportamento assumido por todas as amostras analisadas estão disponibilizadas em apêndice, as tabelas com todas as informações referentes às análises de rugosidade superficial desenvolvidas.

5.2. ANÁLISE DA CAC E ANÁLISE METALOGRÁFICA

Conforme apresentado no capítulo anterior, os resultados aqui mostrados também discutem, simultaneamente, CAC e análise metalográfica em função de

algumas particularidades entre estas análises, que têm como objeto central de estudo as imagens metalográficas das amostras submetidas aos ensaios.

Início da análise marcou-se pela identificação minuciosa da estrutura dos materiais dos corpos de prova, nos dois estados (Beneficiado e Temperado/revenido) antes desta estrutura ser submetida as solicitações dos ensaios, ou seja, em seu estado inicial conforme ilustrado na Figura 43, nas quais a imagem A representa a estrutura inicial do material beneficiado e a imagem B do material temperado/revenido.

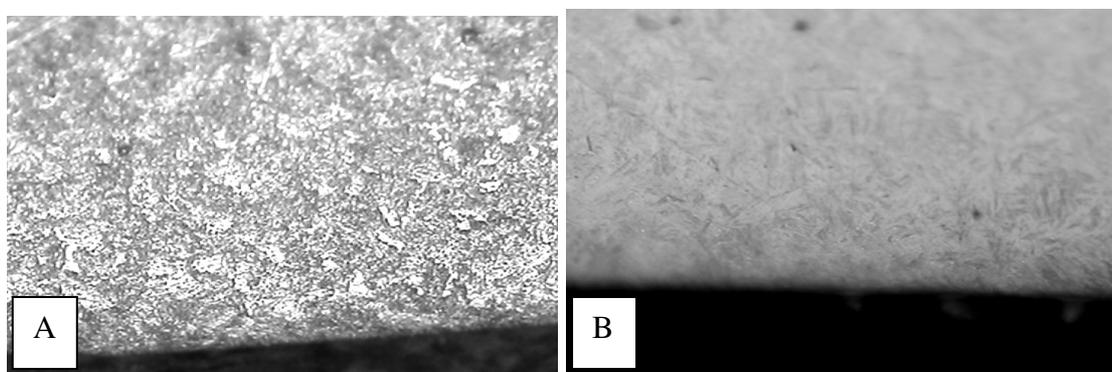


FIGURA 43: ESTRUTURA INICIAL DOS MATERIAIS

Estas análises, embora tendo seus resultados sendo apresentados simultaneamente, são executadas em dois momentos distintos: primeiramente realiza-se a determinação da profundidade da CAC e num segundo momento realiza-se a interpretação dos fenômenos ocorridos nas microestruturas das superfícies e subsuperfícies das amostras.

Para definição da profundidade da CAC foi realizado um levantamento do comportamento CAC ao longo da superfície da amostra analisada; um dos resultados destas análises é apresentado na Tabela 1 como exemplo, estes valores foram obtidos das medições de amostra do ensaio FUBSF (amostra 148). O valor

considerado para efeito de análise foi a média entre os valores encontrados conforme apresentado nesta tabela, ou seja, na análise de CAC para a amostra 148 o valor apresentado de profundidade da CAC foi de 0,0194mm.

TABELA 1: EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA ANÁLISE DA CAC

ângulo (°)	CAC (mm)
90	0,0166
90	0,0184
90	0,0201
90	0,0192
90	0,0238
90	0,0211
90	0,0166
Média	0,0194

5.2.1. ANÁLISE DE CAC NO PROCESSO DE TORNAMENTO

As amostras dos ensaios do processo de torneamento, com o aço no estado beneficiado (TBSF e TBCF) apresentaram comportamentos similares com relação à formação da CAC; estas amostras sofreram alterações do comportamento da CAC, sendo que a maior parte das alterações apresentadas está ligada a reorientação de sua estrutura metalográfica e em apenas alguns casos, e em pequena proporção o aparecimento da CAC propriamente dita. Nas imagens apresentadas na Figura 44 e na Figura 45 pode ser apreciada a análise do comportamento assumido pelas superfícies e subsuperfícies das amostras submetidas aos ensaios TBSF e TBCF.

Nestas imagens são apresentadas, em detalhe, as alterações na microestrutura das amostras e, em alguns pontos, apresentam a formação da CAC e suas respectivas dimensões descritas.

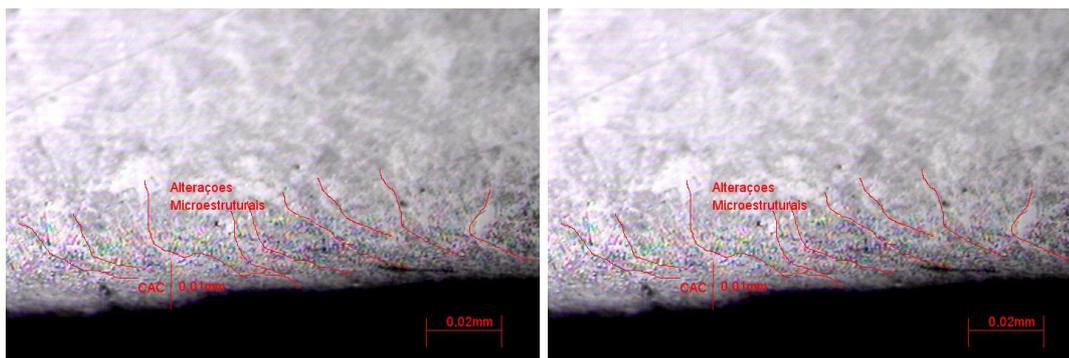


FIGURA 44: ANÁLISE METALGRÁFICA E CAC NO ENSAIO TBSF (AMOSTRA 8 E 15)

O comportamento de alteração microestrutural assumido pelas amostras apresentadas nas imagens da Figura 44 e Figura 45, representa muito bem o comportamento global das amostras analisadas.

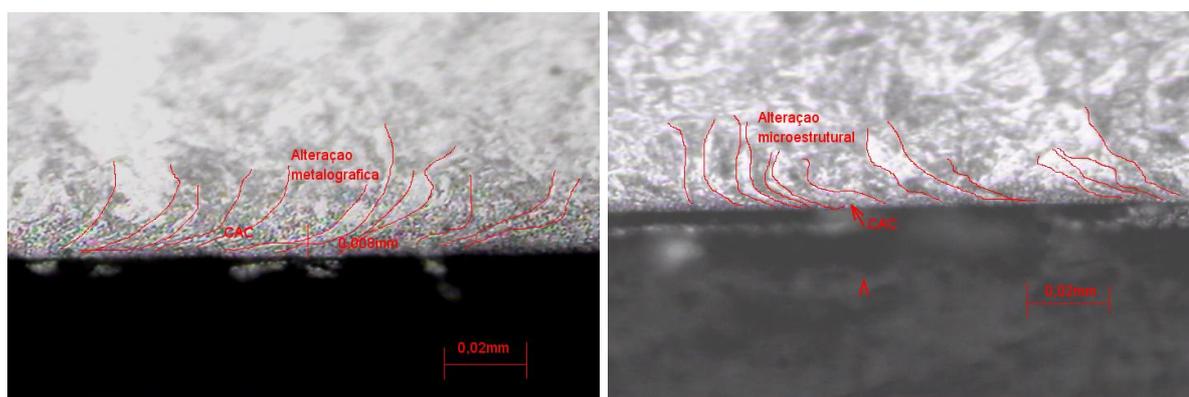


FIGURA 45: ANÁLISE METALGRÁFICA E CAC NO ENSAIO TBCF (AMOSTRA 34 E 50)

No intuito de melhorar a interpretação do comportamento do fenômeno ocorrido nas amostras, nos gráficos da Figura 46, podem ser vistos os efeitos gerados pelos parâmetros de usinagem sob a variável de saída controlada.

Com base nestes gráficos, fica visível a influência que a V_c exerce sobre as alterações microestruturais das peças, pois as respostas obtidas nas análises revelam a existência de diferentes comportamentos para diferentes V_c , tanto para o ensaio TBSF quanto para TBCF.

Os gráficos A e B da Figura 46 representam os resultados do ensaio TBSF, para as velocidades de corte $V_c 1$ e $V_c 3$ (80 e 120 m/min) respectivamente, nos quais se pode perceber uma diferença significativa entre estes valores medidos; nas amostras confeccionadas com $V_c 3$, foram identificadas profundidades de CAC menores que as identificadas nas amostras de $V_c 1$, apenas não se pode afirmar uma ocorrência de tendência, pois com a $V_c 2$ (intermediária) os valores encontrados, em média, superam os valores de $V_c 1$.

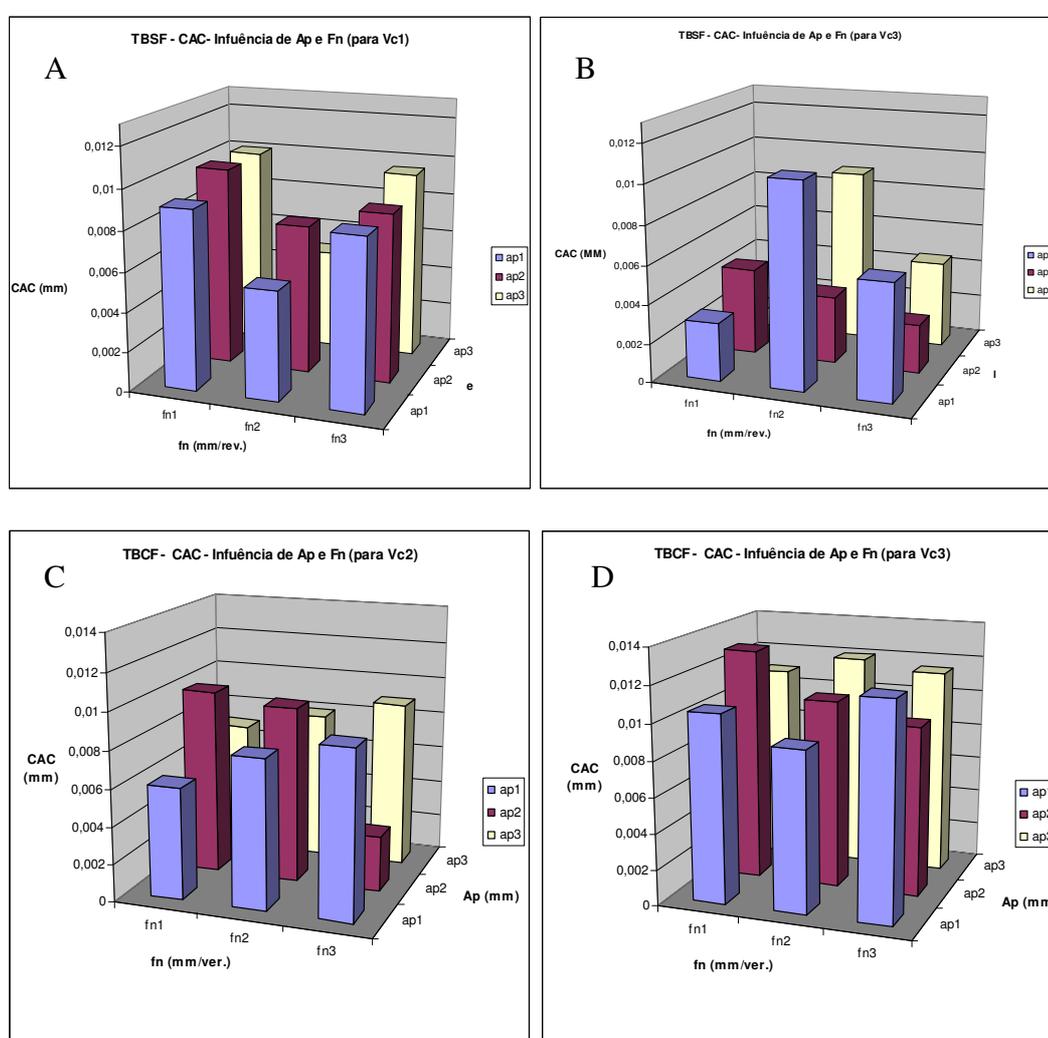


FIGURA 46: GRÁFICOS DOS VALORES DE CAC DOS ENSAIOS TBSF E TBCF

Nos gráficos C e D, representantes do ensaio TBCF, se observa um comportamento inverso do ocorrido entre os gráficos A e B, sendo que para este

ensaio os resultados das análises com a V_c intermediária, em média, foram menores, invertendo o índice de tendência apresentado no ensaio TBSF. Estas alterações comportamentais podem ser atribuídas à utilização do fluido de corte, única diferença entre os parâmetros utilizados.

Com relação ao f_n e a_p , as variações influenciadas por estes parâmetros são relevantes, principalmente em relação ao f_n , pois as alterações detectadas pela variação deste parâmetro estão diretamente relacionadas ao comportamento assumido pelos valores de CAC encontrados; estas variações podem ser mais bem constatadas ao analisar os valores fazendo uma separação em grupos de análise com base em a_p (a_p 1, a_p 2 e a_p 3).

Na Figura 47 são apresentadas imagens realizadas de análises metalográficas feitas nas superfícies de amostras submetidas ao ensaio de torneamento TTSF; nestas imagens identifica-se a existência da formação de CAC e indícios de alterações metalográficas, provocada pela reorientação da microestrutura do material.

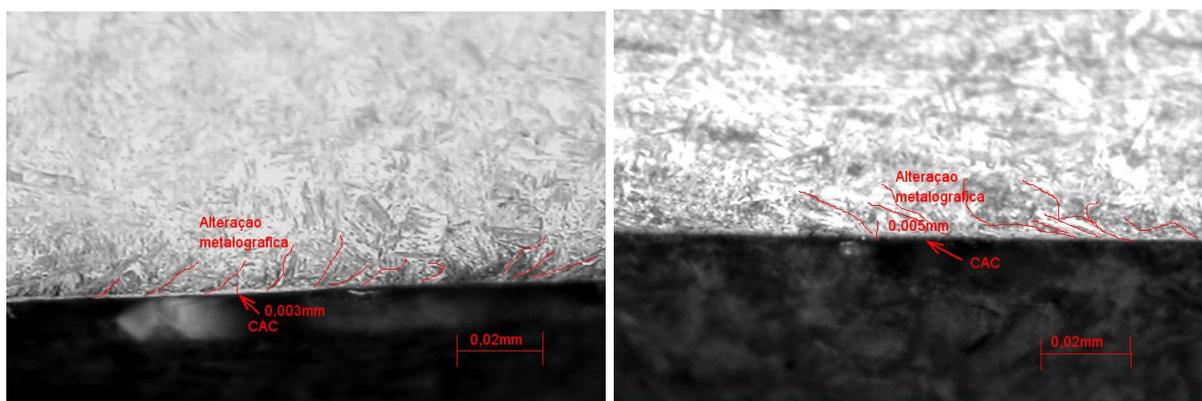


FIGURA 47: ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CAC NO ENSAIO TTSF (AMOSTRA 55)

Esta mesma característica de comportamento pode ser constatada nas imagens da Figura 48, que representam os dados da análise das amostras do ensaio TTCF. De forma diferenciada em relação à formação da CAC, que para os

resultados deste ensaio ficou menos evidente, as alterações de orientação da estrutura ficaram mais evidentes na região analisada.

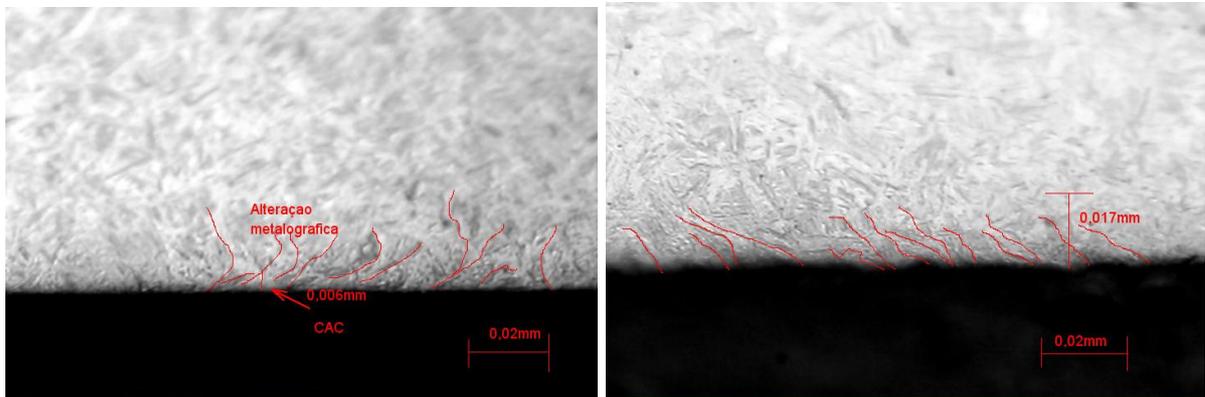


FIGURA 48: ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CAC NO ENSAIO TTCF (AMOSTRA 86 E 100)

Com os gráficos da Figura 49 pode se entender o comportamento assumido pelas amostras em relação a análise de formação da CAC; perceber-se que os valores obtidos são muito reduzidos e que, na variação das velocidades de corte utilizada, ocorre uma flutuação significativa dos valores medidos na análise. Para o maior valor de velocidade constata-se o maior valor médio das profundidades da CAC, sinalizando um indício de tendência demonstrado pelos resultados, promovido pela alteração dos valores de V_c .

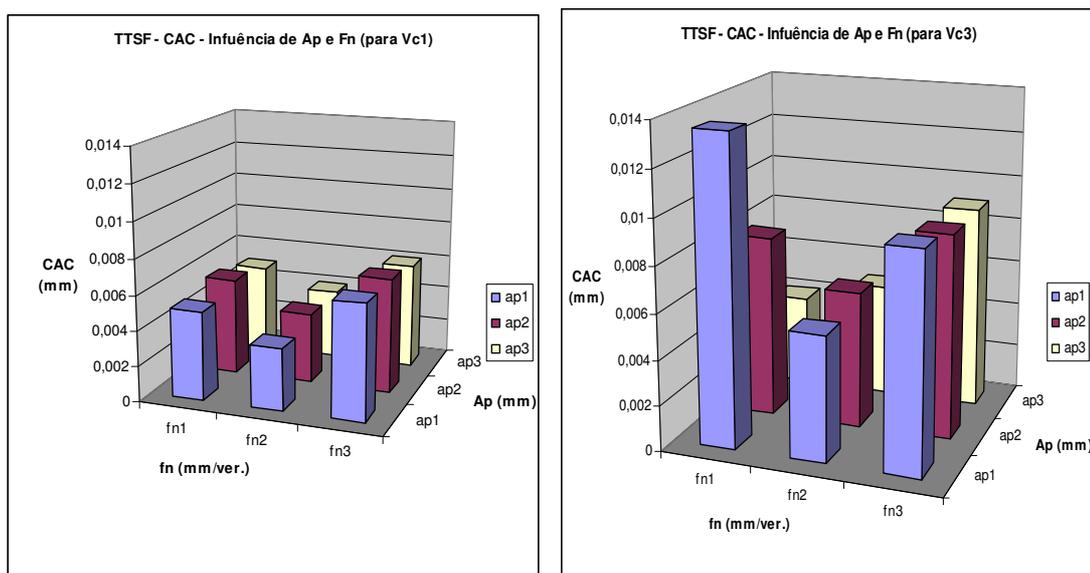


FIGURA 49: GRÁFICOS DOS VALORES DE CAC DOS ENSAIOS TTSF

Com relação a a_p a influência gerada por este parâmetro, sobre a variável aqui analisada, é muito baixa e, em alguns casos, se aproxima da neutralidade, como pode ser observada no gráfico da *Figura 49* das amostras confeccionadas com a V_c 1.

O avanço de corte (f_n) assume um papel importante nos resultados, pois alterações nos valores destes parâmetros influenciaram, significativamente, nos valores obtidos ao longo da análise. Esta influência assume comportamento aleatório ao se observar pelos valores de V_c 1 e V_c 3 encontrados na *Figura 49*, sendo que com a utilização do valor intermediário de avanço (f_{n2}), em todos os conjuntos de amostras, ocorre a redução no valor da variável analisada.

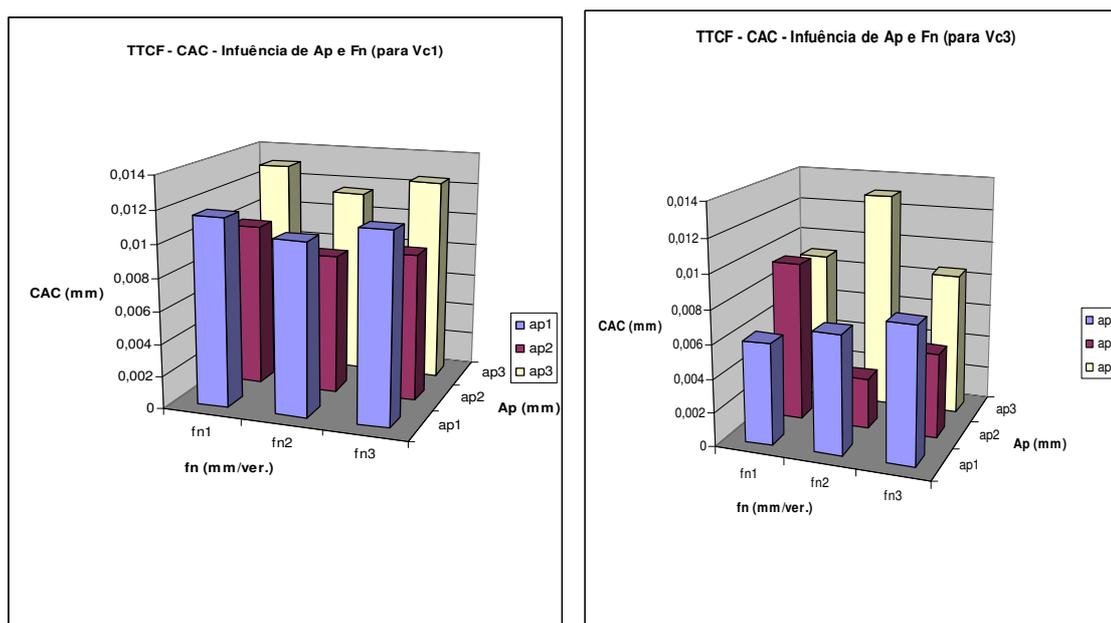


FIGURA 50: GRÁFICOS DOS VALORES DE CAC DOS ENSAIOS TTCF

Com os gráficos apresentados na *Figura 50* pode-se identificar o comportamento assumido pela formação da CAC, nas amostras submetidas ao ensaio TTCF. O comportamento assumido, se analisado em função da V_c , observa-se uma nítida influência deste parâmetro sobre os resultados, sendo que, os valores obtidos tendem a diminuir na medida em que se aumenta o valor da V_c utilizada,

assumindo comportamento inverso ao apresentado pelo ensaio TTST. Vale ressaltar que a única condição de usinagem diferente, entre estes ensaios, está na utilização de fluido de corte (TTST).

A variação nos valores de avanço (f_n) utilizados pouco interfere nos resultados obtidos, porém, esta interferência chega a sinalizar um indicio de tendência em alguns dos grupos analisados.

O a_p influencia de maneira aleatória nos resultados, sendo constante a ocorrência da redução dos valores de CAC, medidas nas amostras confeccionadas com profundidade de corte intermediárias ($a_p 2$).

5.2.2. ANÁLISE DE CAC NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A Figura 51 apresenta uma análise desenvolvida sob uma das amostras submetidas ao ensaio de retificação RTST. Esta análise representa, de maneira clara, como se comportaram as superfícies analisadas deste ensaio, ou seja, as alterações apresentadas assumiram pequenas proporções, não apresentando a formação CAC e apenas algumas influências no comportamento microestrutural das amostras; este comportamento se deu em função dos parâmetros adotados para a execução dos ensaios.

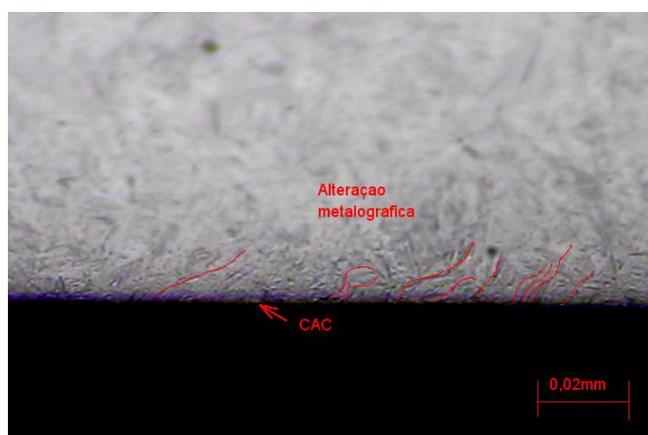


FIGURA 51: ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CAC NO ENSAIO RTST (AMOSTRA 112)

Este fato pode ser mais bem constatado ao se analisar o efeito gráfico dos resultados obtidos, como mostra o gráfico da Figura 52, onde podem ser identificadas as pequenas CAC geradas.

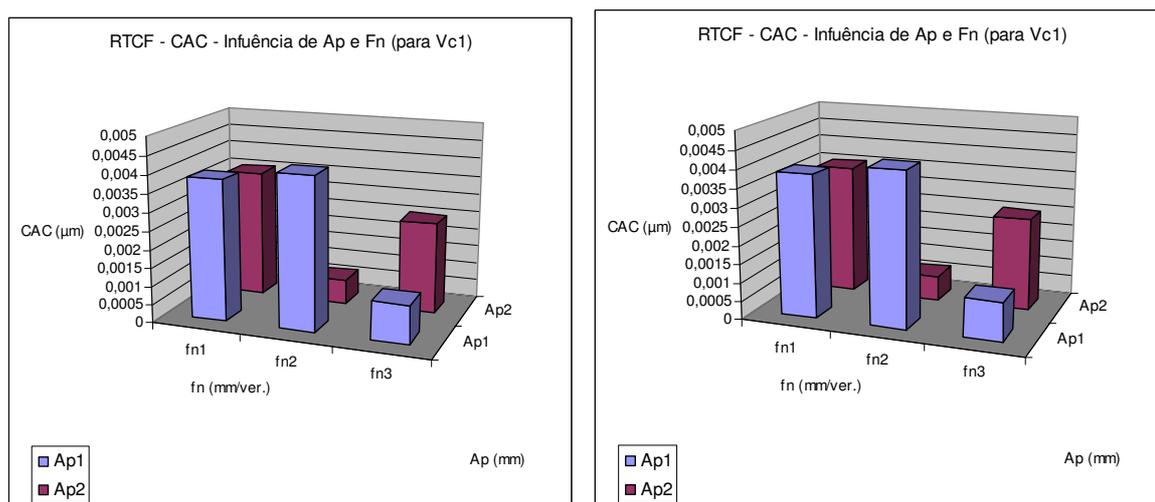


FIGURA 52: GRÁFICO DOS VALORES DA CAC DOS ENSAIOS RTCF

5.2.3. ANÁLISE DE CAC NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Nas imagens apresentadas na Figura 53 são detalhadas duas das análises desenvolvidas sob as amostras do ensaio de fresamento FBSF. Nestas análises podem ser observadas as alterações apresentadas na superfície das amostras analisadas e tais alterações podem sinalizar a existência de alguns fenômenos ligados a integridade superficial das amostras.

Nas amostras do ensaio FBSF, foi constatada a formação da CAC e existência de reorientação da microestrutura analisada; estas alterações foram percebidas em algumas amostras onde as profundidades variaram em torno de 0,02mm.

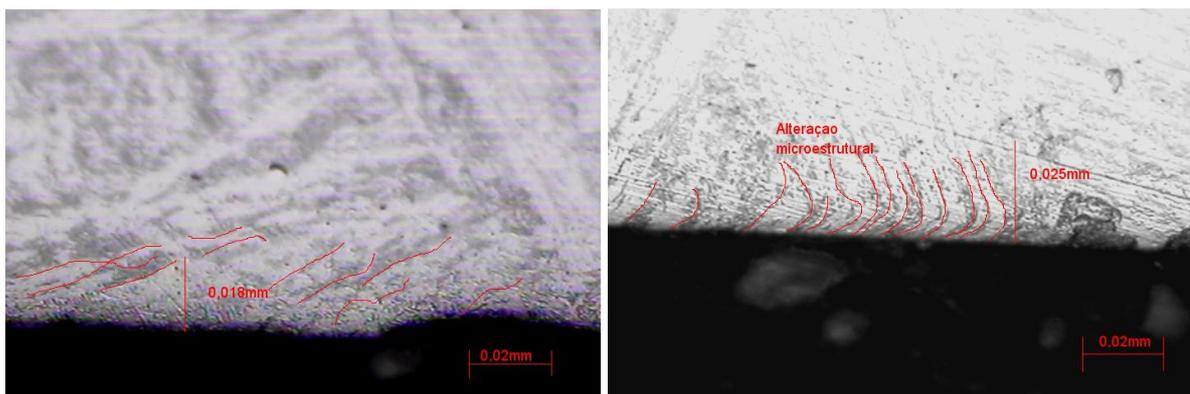


FIGURA 53: ANÁLISE METALOGRÁFICA E DA CAC, ENSAIO FBS F (AMOSTRA 128 E 144)

Nos gráficos apresentados na Figura 54, pode ser observado o comportamento assumido pelas amostras em relação à análise da profundidade da CAC, sendo que nota-se uma baixa influência da V_c sobre a variável analisada, uma vez que na média as variações ocorreram de forma pouco intensa. O f_n demonstrou-se como sendo um parâmetro de influência significativa sobre os resultados analisados.

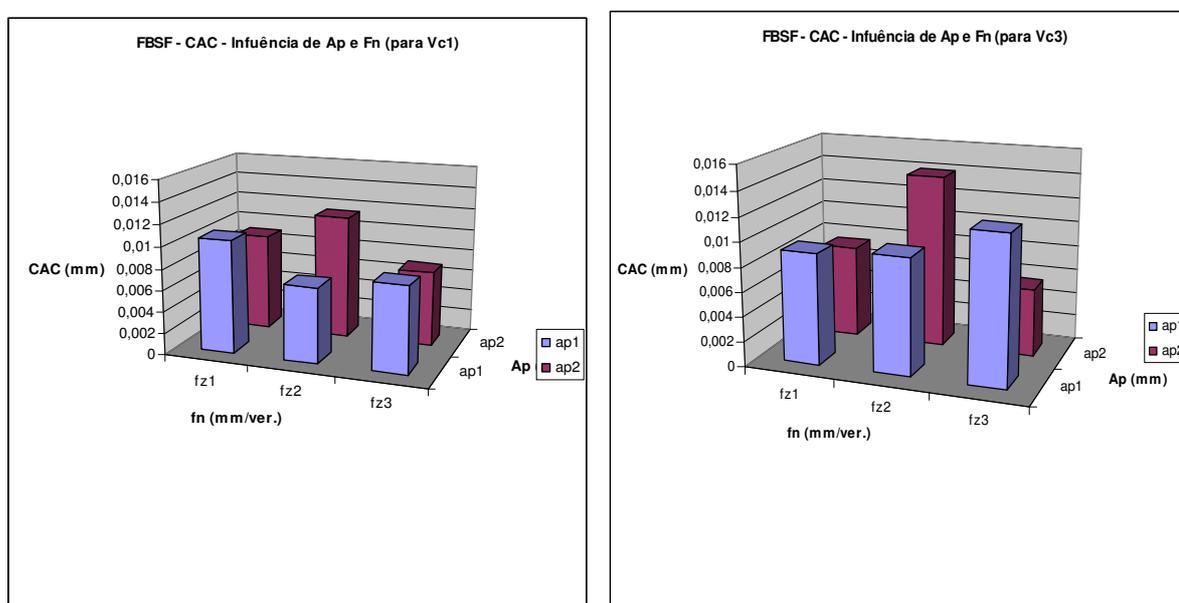


FIGURA 54: GRÁFICOS DOS VALORES DE CAC DOS ENSAIOS FBSF

Nas microestruturas da Figura 55 pode ser observado o comportamento assumido pela microestrutura de duas das amostras submetidas ao ensaio de

furação FUBSF. Nestas amostras também se observa a formação da CAC ao longo da superfície analisada, além da reorientação da microestrutura do material, simbolizada pelas linhas inseridas na imagem durante o processo de realização das análises.

5.2.4. ANÁLISE DE CAC NO PROCESSO DE FURAÇÃO

Este ensaio (FUBSF), dentre os ensaios realizados, foi o ensaio de maior destaque em relação à ocorrência da formação da CAC. A este processo de usinagem em questão deve ser direcionada uma atenção maior, para se manter as condições da integridade superficial das peças usinadas por este tipo de processo.

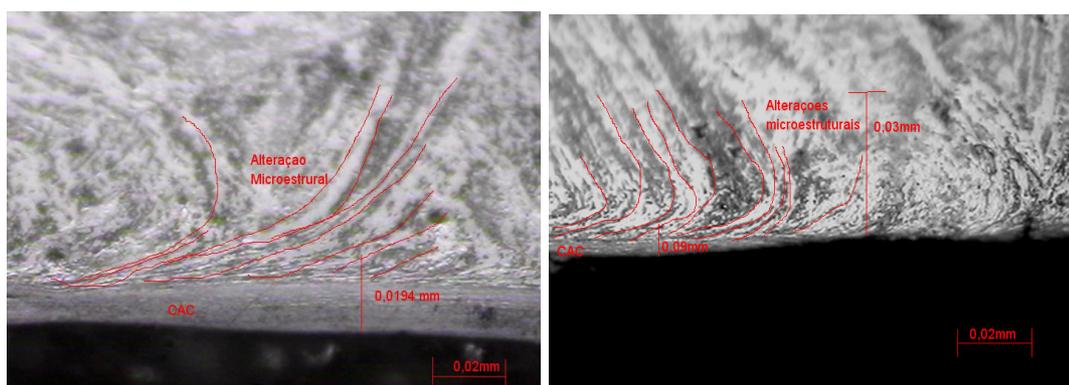


FIGURA 55: ANÁLISE METALOGRAFICA E CAC NO ENSAIO FUBSF (AMOSTRA 148 E 162)

Os gráficos apresentados na Figura 56, trazem o comportamento assumido pelas amostras, ao longo do ensaio FUBSF, em relação à variável de saída CAC. Com estes gráficos, pode ser identificada a influência que os parâmetros de corte exerceram nas superfícies das amostras analisadas.

A variação da V_c gerou alterações significativas nos resultados das análises da CAC, indicando uma correlação entre os valores de V_c ($V_c 1$, $V_c 2$ e $V_c 3$) com os valores de CAC apresentados. Esta correlação sinaliza um indício de tendência no comportamento gerado pela alteração da V_c . Percebe-se que na medida em que se

diminuem os valores de V_c , obtêm-se valores médios de profundidade da CAC maiores.

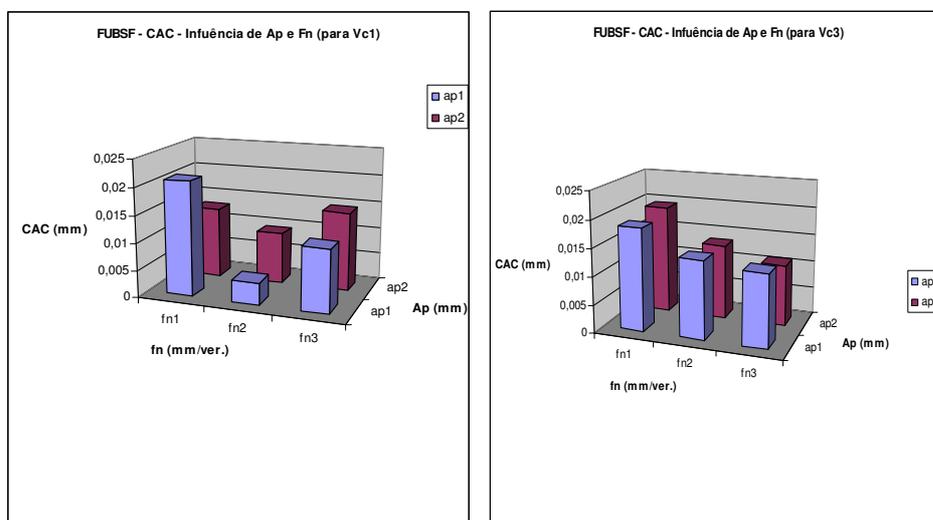


FIGURA 56: GRÁFICOS DOS VALORES DE CAC DOS ENSAIOS FUBSF

O avanço de corte promove alterações significativas no comportamento de formação da CAC, pois quando combinado com a V_c 3 proporciona um comportamento tendencioso nos resultados analisados, sendo que avanços maiores resultam em maiores profundidades da CAC.

A relação P/D exerce pouca influência sobre os resultados obtidos e em alguns conjuntos de amostra analisados, sua influência chega quase que à neutralidade.

5.3. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL

A análise de tensão residual foi desenvolvida em algumas das amostras obtidas pelos ensaios; as análises não foram desenvolvidas em 100% das amostras em função de limitações citadas no capítulo anterior. A descrição das análises, mais a escolha das amostras a serem analisadas foram realizadas de maneira a

selecionar amostras que apresentem, pelo menos, uma de cada combinação dos parâmetros utilizados.

5.3.1. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Os gráficos da Figura 57 apresentam o comportamento assumido pelas amostras, obtidas pelos ensaios TBSF e TBCF em relação à tensão residual, ao longo da superfície analisada. Os resultados apresentados nestes gráficos demonstram o comportamento da tensão residual encontrados nas superfícies das amostras analisadas.

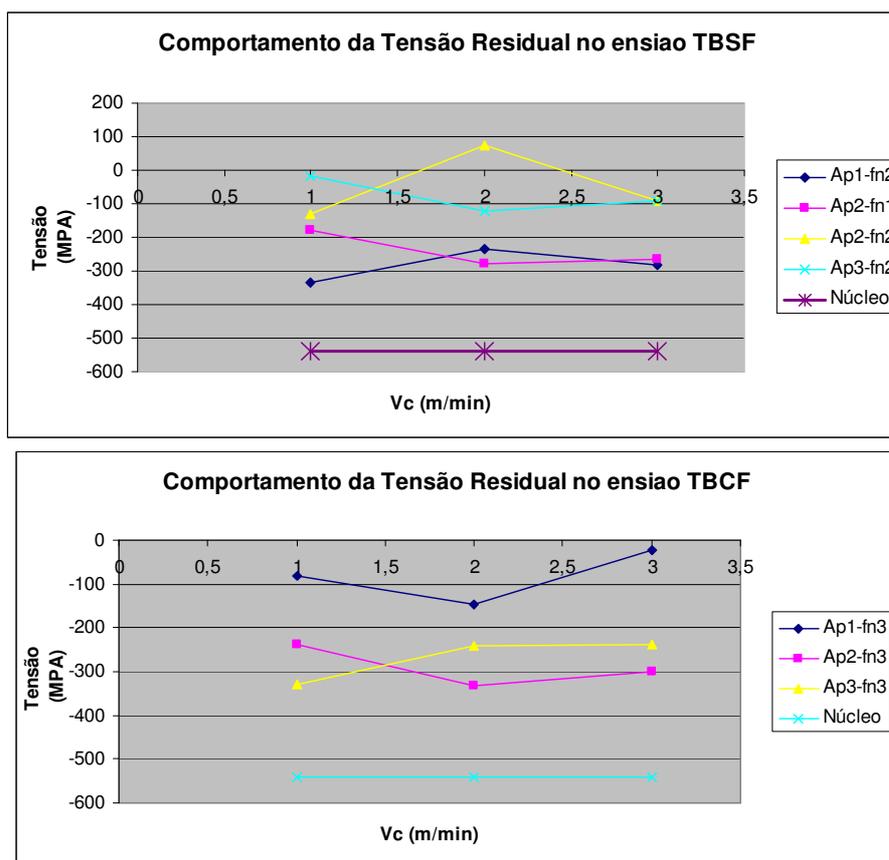


FIGURA 57: GRÁFICOS DE TENSÃO RESIDUAL DOS ENSAIOS TBSF E TBCF

Os resultados obtidos nas amostras dos ensaios TBSF e TBCF, apresentaram redução no estado de tensão residual de compressão tendendo a se aproximar de valores de tensão de tração, em todas as amostras analisadas.

A V_c promove algumas alterações no comportamento da tensão residual, estas alterações assumiram comportamentos pouco significativos, principalmente nas amostras do ensaio TBCF. Estas alterações se demonstram de forma aleatória, não sinalizando nenhuma espécie de tendência demonstrada ao longo dos resultados apresentadas.

A profundidade de corte (a_p) demonstra-se muito influente no comportamento dos resultados da análise de tensão residual, sendo que na medida em que se aumenta o valor da profundidade se reduz a tensão compressiva, podendo, dependendo da aplicação, comprometer a integridade superficial das peças.

O avanço de corte se mostrou como sendo um parâmetro influente nas respostas da análise de tensão residual podendo se levar a tensão ao estado de tração, fenômeno não aconselhado para algumas aplicações da peça em questão.

Os parâmetros de profundidade de corte e avanço, em função de promoverem alterações significativas na superfície dos materiais devem ser muito bem dimensionados; atribui-se a estes parâmetros boa parte das características da integridade superficial das amostras.

Os gráficos apresentados na *Figura 58* retratam o comportamento assumido pelas amostras submetidas aos ensaios TTSF e TTCF, amostras que apresentam variação em menor proporção das apresentadas nos ensaios TBSF e TBCF.

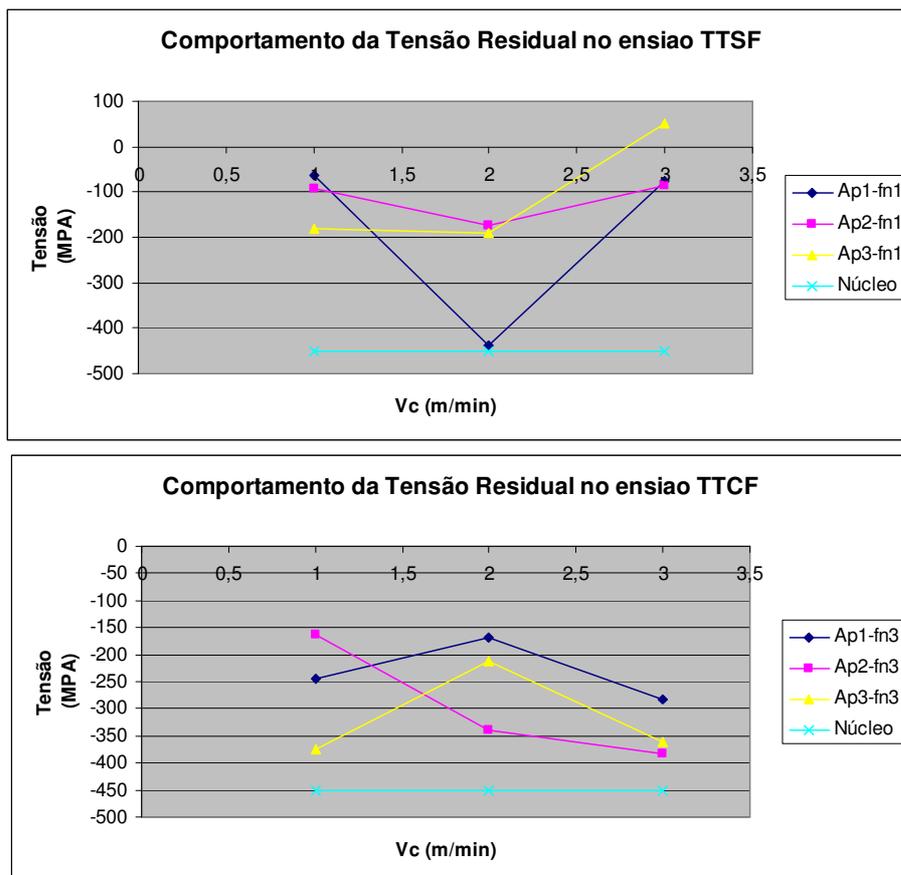


FIGURA 58: GRÁFICOS DE TENSÃO RESIDUAL DOS ENSAIOS TTSF E TTCF

A profundidade de corte para estes ensaios se apresenta como um parâmetro relevante na influência gerada no comportamento de tensão residual das amostras, sendo que no ensaio TTSF, com a utilização de a_p 3 (0,125mm) os valores de tensão obtidos se aproximam dos valores de tração, e ao utilizar a_p 2 (valor intermediário) os valores de tensão residual obtidos se aproximam dos valores obtidos inicialmente.

O avanço de corte promove alterações significativas no comportamento do estado de tração para ensaio com característica similar as encontradas nos ensaios TTSF e TTCF. O comportamento assumido pela tensão em relação ao avanço de corte é que para avanços de cortes com valores maiores obtêm-se valores superiores de tensão compressivas.

5.3.2. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

O gráfico da *Figura 59* apresenta os resultados obtidos na análise de tensão das superfícies das peças submetidas ao ensaio RTCF.

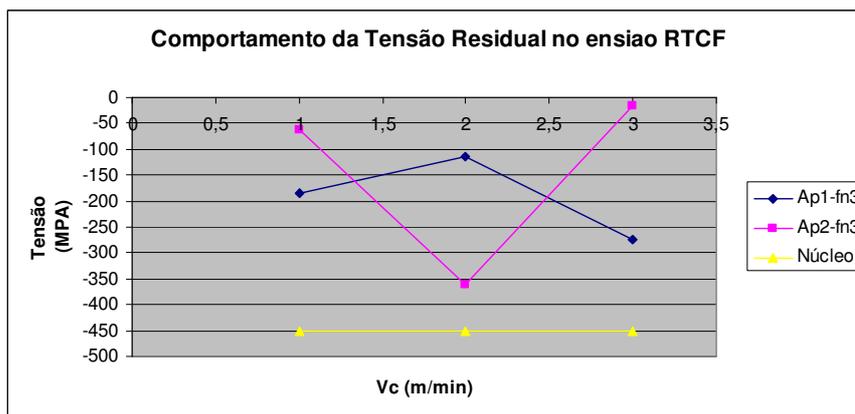


FIGURA 59: GRÁFICOS DE TENSÃO RESIDUAL DOS ENSAIOS RTCF

As alterações apresentadas no ensaio de retificação não apresentaram nenhuma espécie de tendência, apresenta resultados de tensão residual, demonstrando uma aleatoriedade entre os valores obtidos em análise, proporcionado pela variação dos parâmetros. De maneira geral, o comportamento assumido foi o comportamento de redução dos valores de tensão compressivos, chegando a algumas situações a atingir estados de tensão de tração.

A profundidade de corte apresenta influência sobre os resultados obtidos com a análise de tensão residual, sendo que esta influência passa a ser mais significativa quando combinada com o parâmetro de V_c .

Com base nos resultados, em média, os valores obtidos com a profundidade de corte a_{p2} geraram os valores de tensão mais próximos do estado de tensão, com

exceção dos valores combinados com a V_c 2, que tiveram sua tensão residual em patamares próximos ao estado inicial.

5.3.3. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO

No gráfico da Figura 60 é apresentado o comportamento assumido pela análise de tensão residual das amostras submetidas ao ensaio de fresamento FBSF.

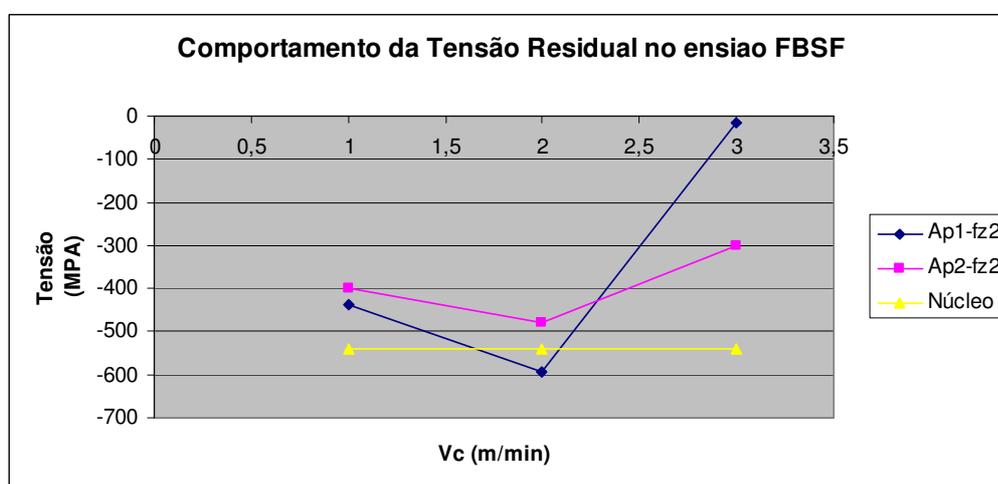


FIGURA 60: GRÁFICOS DE TENSÃO RESIDUAL DOS ENSAIOS FBSF

Para o ensaio FBSF a V_c apresenta-se como muito relevante na promoção das alterações de comportamento da tensão residual das amostras apresentados nos resultados dessas análises. Atingindo em situação combinada com V_c 3 a estados de tensão residual de tração.

Os valores obtidos nesta análise não se distanciam muito dos valores de tensão residuais encontrados nas amostras no início dos ensaios e, também, não promovem tendência nos comportamentos das ocorrências de tensão que possam ser direcionadas a um dos parâmetros de cortes utilizados.

5.3.4. ANÁLISE DE TENSÃO RESIDUAL NO PROCESSO DE FURAÇÃO

No gráfico apresentado pela Figura 61, pode ser observado o comportamento assumido pela tensão residual nas amostras submetidas ao ensaio de furação FUBSF.

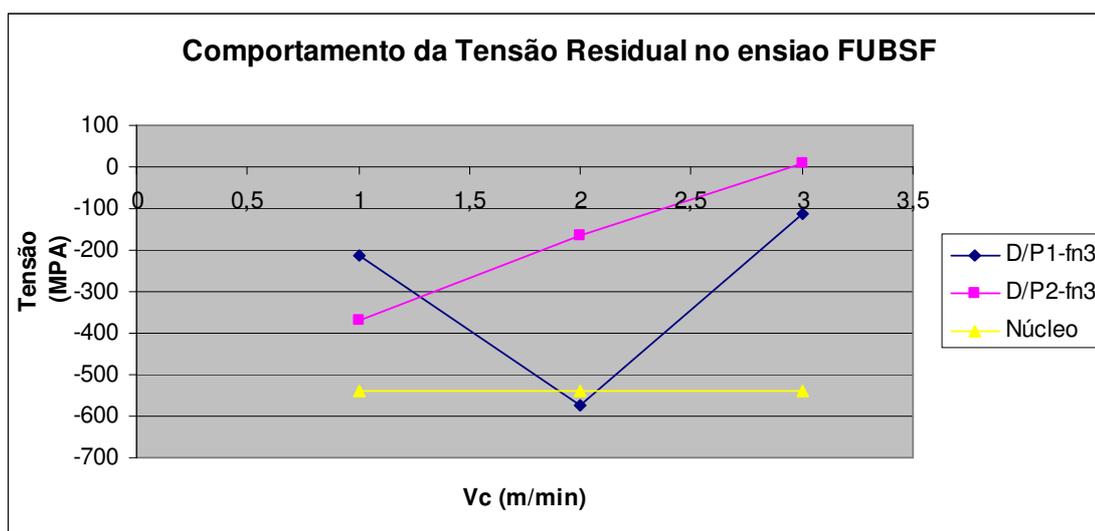


FIGURA 61: GRÁFICOS DE TENSÃO RESIDUAL DOS ENSAIOS FUBSF

No ensaio FUBSF percebe-se uma influência significativa da V_c principalmente quando utilizada a relação D/P2, onde, além da ocorrência de tensão no estado de tração, também ocorre uma tendência no comportamento sinalizada ao longo da análise dos resultados. Ou seja, na medida em que se diminui a intensidade da V_c a tensão residual tende-se a valores de tração. O comportamento dos valores de tensão residual assumido pelas amostras está muito relacionado com os valores de V_c .

A profundidade de corte também se mostra como influente nos resultados de tensão residual assumido pelas amostras do ensaio FUBSF.

Este processo de usinagem em questão deve tratar de maneira criteriosa a escolha dos parâmetros de corte, principalmente a V_c utilizada.

5.4. ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL

Para melhor visualização do comportamento desenvolvido pelas amostras ao longo dos ensaios, e para melhor visualização dos efeitos gerados pelos parâmetros de corte sobre a superfície das peças submetidas aos processos de usinagem, são apresentados gráficos confeccionados com os valores obtidos em cada uma das análises realizadas, buscando a identificação de comportamento que sinalize a evolução nas alterações ocorridas nas superfícies das amostras analisadas.

Conforme metodologia de ensaio utilizada e descrita anteriormente, o desenvolvimento dos ensaios seguiram critérios de variações de parâmetros de usinagem (V_c , a_p , f_n , f_z , D/P e Fluido de corte). Tais variações visam identificar o quanto cada um destes parâmetros influenciam na integridade superficial das peças analisadas. Neste texto são apresentados os resultados da análise de dureza da superfície visando levantar o comportamento assumido pelas peças analisadas.

Para tal identificação foi necessária a realização de uma análise criteriosa e seletiva, buscando sempre situações que viabilizassem a interpretação da alteração desta variável dependente (dureza superficial), buscando, desta forma, correlacionar às alterações na integridade superficial com os parâmetros de usinagem utilizados. Portanto, foram analisados todos os dados comportamentais das amostras, sempre evidenciando uma a uma destas variáveis do processo, ou melhor, o quanto e de que maneira, cada um dos parâmetros de corte interfere no resultado dos ensaios.

5.4.1. ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Para os ensaios TBSF, TBCF, TTSF e TTCF o critério adotado para construção dos resultados consistiu no isolamento dos parâmetros de usinagem.

O início desta análise se deu seguindo a mesma proposta apresentada na análise de rugosidade superficial (R_a), ou seja, foram realizados agrupamentos dos valores das medições, podendo evidenciar o efeito gerado por cada um dos parâmetros de corte. Este agrupamento das amostras baseou-se na formação de grupo relacionando à V_c (V_{c1} , V_{c2} e V_{c3}), viabilizando, assim, a identificação isolada das alterações proporcionadas por cada um dos parâmetros de corte envolvidos.

Visualizando graficamente cada um destes agrupamentos é possível constatar o comportamento assumido pela variável de saída monitorada, ao se variar as condições de avanço (f_n) e a profundidade de corte (a_p) e, ainda, averiguar a influência gerada pela condição de lubri-refrigeração.

Os gráficos da Figura 62 apresentam o comportamento assumido pela dureza superficial das amostras analisadas, possibilitando um comparativo entre a influência dos parâmetros de corte sob os resultados.

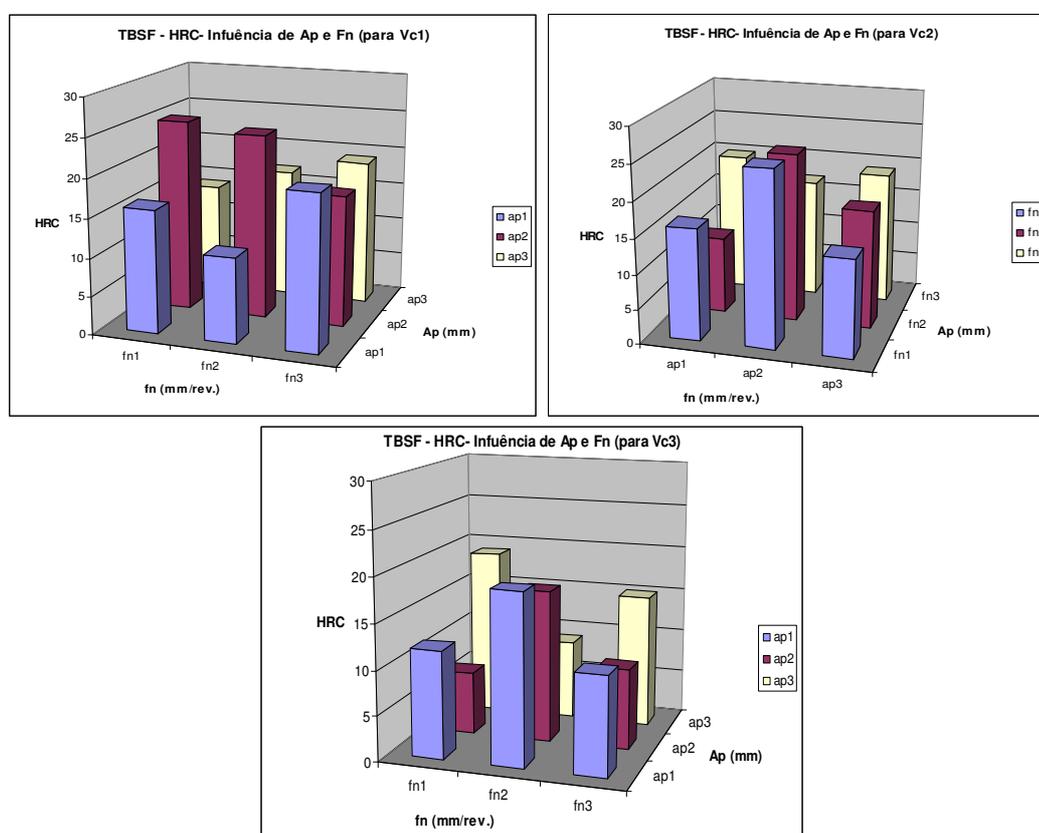


FIGURA 62: RESULTADO DE DUREZA HRC NO ENSAIO TBSF

Diferente do ocorrido no resultado das análises da rugosidade superficial, onde ficou muito nítida a influência de um dos parâmetros sobre os resultados apresentados, aqui na dureza superficial não fica muito evidente a constatação de um parâmetro mais influente, mas que através de um estudo mais aprofundado podem ser identificados indícios de influência pouco mais significativa do parâmetro de avanço (f_n).

Com relação à formação de uma espécie de tendência, assumida pelas durezas superficiais das amostras analisadas, se comparadas dentro dos próprios conjuntos de amostras, torna-se difícil de afirmar a existência de tal tendência, devido ao comportamento visualizado nos gráficos da Figura 62.

Das 27 situações (valores de HRC) analisadas ao se comparar com o estado inicial de dureza encontrado no material, pôde ser constatado que aproximadamente 37% das superfícies medidas tiveram um acréscimo no valor de sua dureza, 41% uma redução e 22% não apresentaram alterações no valor medido (Figura 62).

Esta variação assume caráter aleatório em que podem ser percebidas situações comportamentais adversas. Tomando como base, o gráfico de V_c 1, ao se analisar o comportamento em função de f_n (variando f_n) nota-se que de 3 combinações possíveis encontram-se 3 diferentes situações (crescente, decrescente e alteração do valor intermediário) e ao se analisar em função de a_p tem-se 3 alterações dos valores intermediários.

Este comportamento aleatório se repete para os outros 2 gráficos. Ao analisar estes dados em função da V_c , nota-se uma sutil diminuição nos valores de dureza encontrados ao longo de V_c 1, V_c 2 e V_c 3 (80, 100 e 120 m/min) este fato se confirma ao extrair a média entre os valores.

A seguir apresentam-se os gráficos dos resultados do ensaio TBCF, utilizando os mesmos parâmetros de corte do ensaio visto anteriormente, variando apenas a condição de lubri-refrigeração; os gráficos que demonstram o perfil de dureza superficial destes ensaios são apresentados nos gráficos da Figura 63.

Nos gráficos da Figura 63 segue o comportamento de dureza superficial das amostras submetidas ao ensaio TBCF, que pouco se diferencia das condições de ensaios das amostras da análise anterior, sendo que a única coisa que as diferencia, de tal análise é a existência do fluido de corte no momento da execução da usinagem.

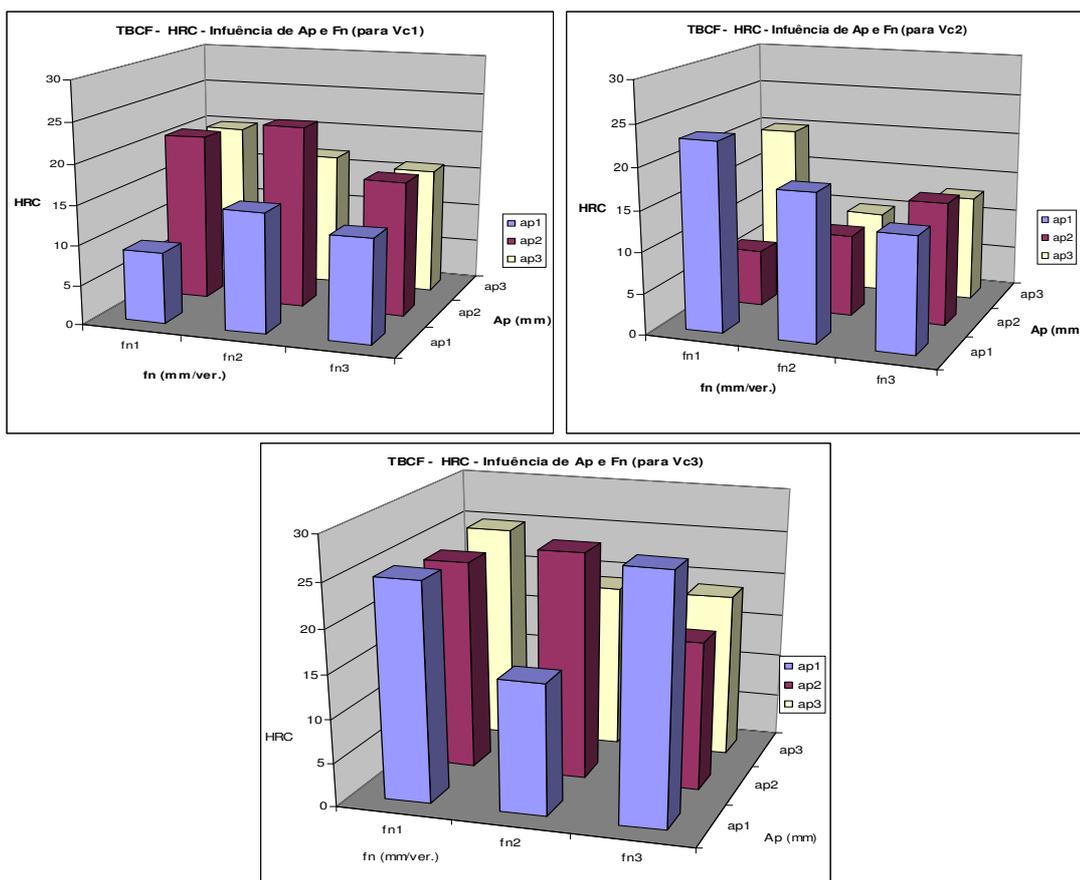


FIGURA 63: RESULTADO DA ANÁLISE DE DUREZA HRC ENSAIO TBCF

Pode-se destacar como visível diferença, a existência de um acréscimo no valor de dureza superficial, apresentados nos resultados dos gráficos de Vc1 e Vc2, ou seja, percebe-se uma alteração no comportamento de dureza, diferente do

comportamento apresentado pelos ensaios sem a utilização do fluido de corte. Já nas amostras confeccionadas com V_c3 nota-se uma elevação significativa nos valores de dureza apresentados.

No gráfico que representa a V_c3 nota-se um acréscimo geral na intensidade de dureza, apresentado pelas amostras em relação ao estado inicial, alteração mais evidenciada nas condições de usinagem que trazem como parâmetros de corte os avanços f_n1 e $f_n 2$ (0,35 e 0,25 mm/rev). Nestes casos a maioria dos valores apresentados atinge valores de dureza em torno de 24 HRC.

Na busca de maior afirmação desta ocorrência, verifica-se que a média dos valores de dureza superficial, apresentada entre os grupos, varia entre 16,8 HRC ($V_c 1$), 14,5 HRC ($V_c 2$) e 22 HRC ($V_c 3$), sinalizando uma diferença de comportamento entre os grupos de amostras. Esta média também reforça outro ponto observado nos gráficos, que para uma V_c intermediária ($V_c 2 = 100$ m/min) a dureza superficial imprimiu um comportamento de redução dos valores obtidos em média são menores que os valores de dureza iniciais do material.

Os gráficos apresentados na Figura 64 mostram o perfil apresentado pelas leituras de dureza superficial encontradas nas amostras do ensaio TTSTF, assim como nos gráficos anteriores, estes também trazem as amostras divididas de forma a possibilitar a interpretação de possíveis alterações nas condições analisadas em relação aos parâmetros utilizados.

Com o auxílio dos gráficos apresentados na Figura 64, pode-se destacar o comportamento de dureza superficial, assumido pelos corpos de provas submetidos ao ensaio TTSTF. Nota-se uma considerável redução de dureza, de maneira geral, em relação ao estado inicial do material cuja dureza variava em torno de 53-54 HRC.

Numa análise pontual dos resultados apresentados graficamente, é possível encontrar pontos de redução de dureza com variação de até 7 HRC, levando o material encontrado em condições iniciais de dureza na ordem de 54 HRC para condições que podem atingir pontos de até 47 HRC, sem o menor controle sobre tais alterações de características.

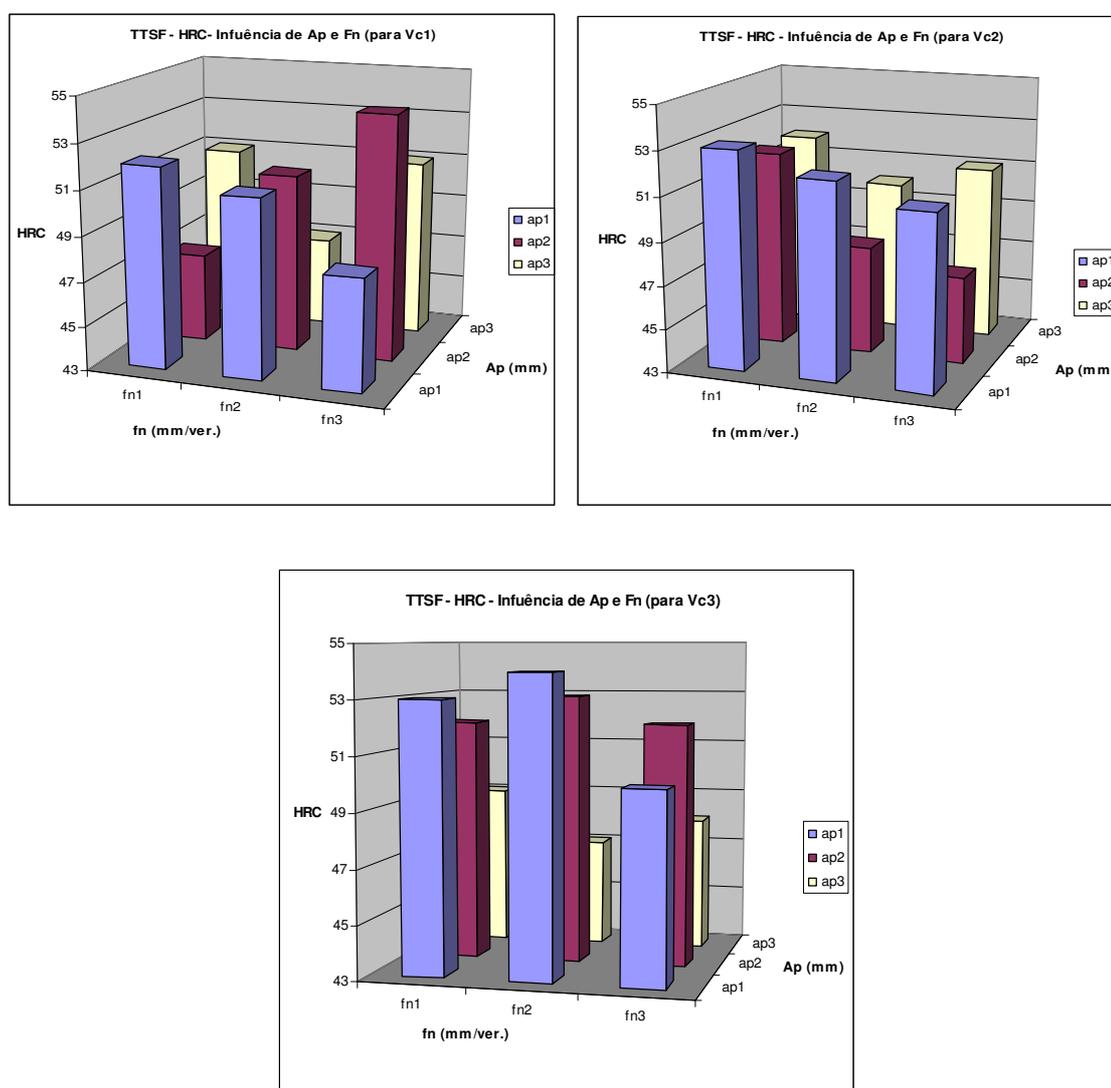


FIGURA 64: RESULTADO DA ANÁLISE DE DUREZA HRC ENSAIO TTSF

As amostras que apresentaram os menores valores de dureza compartilham de condições de usinagem, nas quais são utilizados os menores valores de avanço (fn) e de profundidade de corte (a_p). Neste ensaio não foi constatada elevação no

estado de dureza, sendo que os maiores valores apresentados encontram-se dentro da faixa de dureza inicial apresentada.

Tais oscilações no comportamento de dureza podem levar a possíveis alterações na microestrutura, provocando um rearranjo cristalográfico indesejado na superfície e subsuperfície das peças.

Neste ensaio pode ser notada uma influência significativa da profundidade de corte, nos valores analisados, principalmente nos conjuntos que utilizam de V_c 2 e V_c 3, onde surgem, inclusive, indícios de tendência comportamentais, podendo atrelar a redução dos valores de profundidade de corte (a_p) a uma possível redução no comportamento de dureza das amostras.

O avanço mostra-se com um parâmetro que promove alterações, mais de maneira desordenada, não sendo possível através dos resultados gráficos sinalizar um comportamento assumido pelas variações proporcionadas pelo parâmetro de avanço; contudo, ele promove alterações, em pequena escala, ao longo dos resultados obtidos, nas análises de dureza superficiais deste ensaio.

Estes resultados apontam para uma influência significativa da profundidade de corte sobre os resultados analisados e, ainda, um comportamento pouco representativo da V_c sobre as variáveis de saída analisada.

Nos gráficos apresentados na Figura 65 pode ser observado o comportamento assumido pela dureza superficial ao longo da análise desta variável nas amostras submetidas ao ensaio TTCF.

Em relação ao ensaio TTSF, os resultados das análises deste ensaio, apresentam flutuação pouco mais representativa entre os valores médios de dureza aqui apresentados. Destacando que, para as mesmas condições de corte,

adicionando apenas a utilização do fluído de corte, tem-se a seguinte variação entre as médias, considerando os agrupamentos realizados em função de V_c :

✓ V_c 1 - são encontrados valores médios na ordem de 49 HRC para o ensaio TTCF contra 50,3 HRC do ensaio TTSF.

✓ V_c 2 - são encontrados valores médios na ordem de 51 HRC para o ensaio TTCF contra 50,6 HRC do ensaio TTSF.

✓ V_c 3 - são encontrados valores médios na ordem de 52,3 HRC para o ensaio TTCF contra 50,8 HRC do ensaio TTSF.

Este comportamento confere aos resultados um intervalo maior entre as médias encontradas, sinalizando, assim, uma possível interferência da V_c sob os efeitos gerados na variável de saída analisada, nas amostras submetidas ao ensaio TTCF.

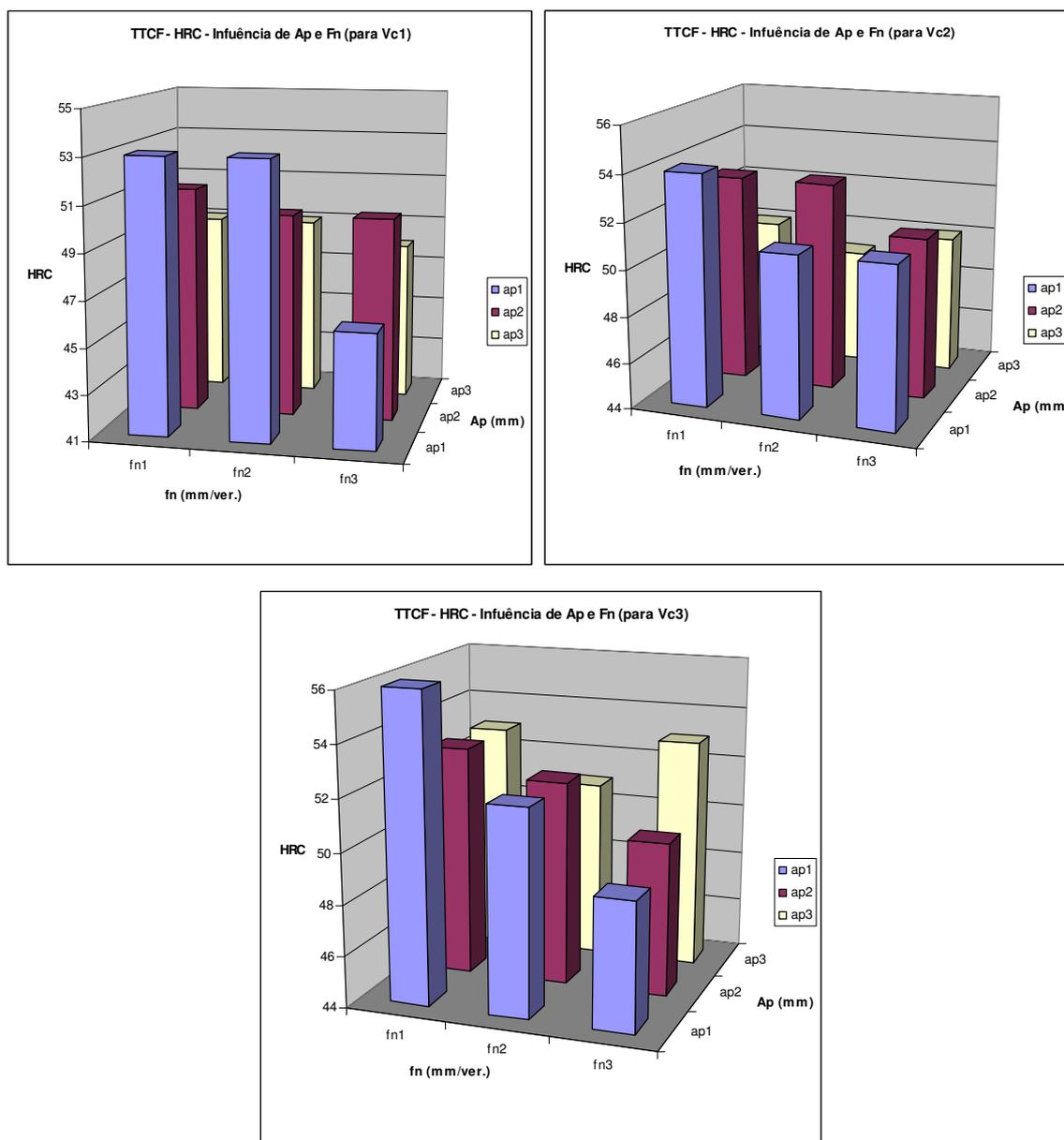


FIGURA 65: RESULTADO DA ANÁLISE DE DUREZA HRC ENSAIO TTCF

O parâmetro de avanço (f_n) neste ensaio passa a influenciar os resultados de maneira mais evidente e esboçando certa tendência nos resultados, principalmente quando analisado em subgrupos de colunas, individualizando as profundidades de corte (subgrupo a_{p1} , a_{p2} e a_{p3}), ou seja dos nove subgrupos existentes, há apenas 2 deles, não confere a característica de tendência, promovida por f_n .

À profundidade de corte, se atribui uma influência em menor escala e de maneira não tão tendenciosa aos resultados da análise desenvolvida; sua influência

é mais bem percebida nos gráficos dos valores de V_c 1 e V_c 2, sendo que para V_c 3 a influência se apresenta de maneira menos intensa e com comportamento assumido de maneira aleatória.

Nos resultados obtidos com o ensaio TTCF, ficam expressivas as alterações promovidas pelo parâmetro de avanço (f_r), sobre as alterações comportamentais das amostras. Vale ressaltar a interferência gerada pela V_c em relação à redução da dureza encontrada nas amostras submetidas à maior V_c utilizada no ensaio.

5.4.2. ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Nos gráficos apresentados na Figura 66 podem ser observados os resultados obtidos na análise das amostras submetidas ao ensaio RTCF.

Com a representação gráfica apresentada na Figura 66, percebe-se que houve, de maneira geral, um comportamento de redução dos valores de dureza superficiais medidos nas superfícies das amostras submetidas ao ensaio de retificação, ou seja, quase que na totalidade das amostras ocorreu uma diminuição dos valores de dureza superficial medidos, sendo que das 18 amostras analisadas neste ensaio, um total de 10 amostras apresentaram uma dureza superficial, pós ensaio, inferior a dureza inicial do material; outras 7 amostras mantiveram o valor de dureza igual ao inicial e em apenas 1 delas, houve um acréscimo na dureza encontrada (55 HRC).

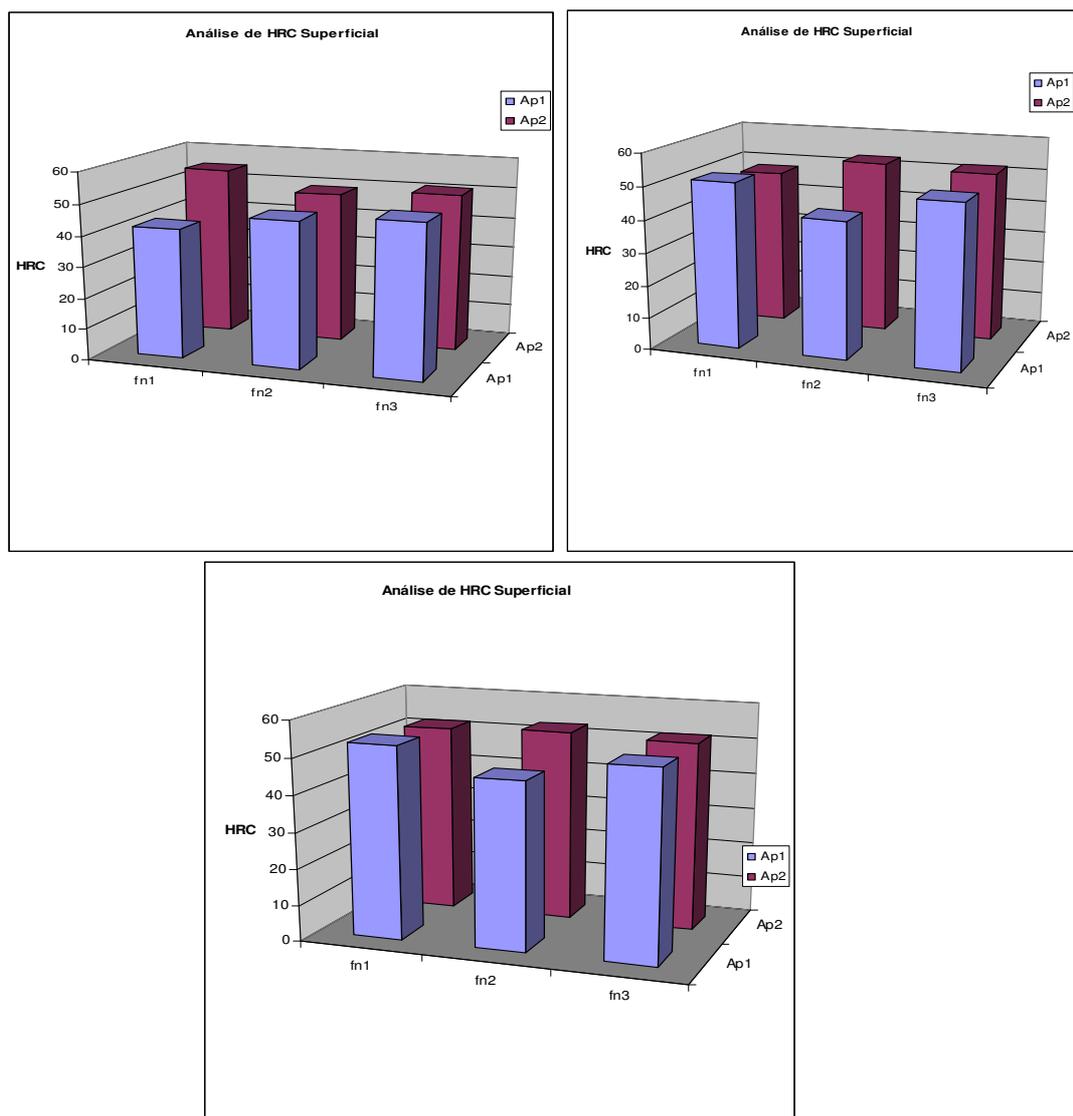


FIGURA 66: RESULTADO DA ANÁLISE DE DUREZA HRC ENSAIO RTCF

Analisando os grupos formados em relação à V_c (V_c 1= 40, V_c 2= 30 e V_c 3= 20 m/s.), os resultados apresentados indicam uma tendência no comportamento dos valores dureza superficial obtidos no ensaio RTCF, ou seja, os valores sinalizam para uma redução da dureza superficial a medida em que se aumenta a V_c ; este comportamento pode ser percebido nas representações gráficas apresentadas na Figura 66. Na busca de maiores evidências em relação a este comportamento, ele também pode ser identificado ao se extrair a média aritmética entre os valores obtidos, das quais se têm as médias para:

- ✓ $V_c1 = 48,7$ HRC;
- ✓ $V_c2 = 49,4$ HRC;
- ✓ $V_c = 51,4$ HRC.

A profundidade de corte (a_p) promoveu pequenas alterações apenas em algumas das amostras e, na maioria dos casos, a variação do parâmetro de corte a_p , resulta em valores medidos idênticos ou muito similares tanto para a_{p1} quanto para a_{p2} . Vale ressaltar que nos pontos onde ocorreram alterações da dureza (diferença entre as amostras) os valores em a_{p2} são maiores que os identificados em a_{p1} .

As alterações percebidas com a variação de f_n para uma análise gráfica, por muito sensível, pode ser difícil de interpretar, pois estas alterações ocorrem de maneira aleatória, dificultando a interpretação e definição de um comportamento de tendência para os resultados. Porém, existe uma alteração que pode ser manifestada ao se quantificar a variação entre os pontos de máximo e de mínimo entre as medidas, onde se encontra o caso mais crítico da análise, uma variação de 9 HRC, para o mesmo conjunto de amostra.

Desta forma, para o ensaio de retificação com características similares à utilizadas em RTCF, a V_c se mostrou como sendo um parâmetro relevante dentro de uma análise do comportamento da dureza superficial. Reforçando o fato de que para o ensaio de retificação os resultados obtidos diferem dos resultados obtidos nos outros ensaios, ao se diminuir a V_c ocorre um aumento no comportamento da dureza superficial.

5.4.3. ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FRESAMENTO

Nos gráficos da Figura 67, pode ser observado o comportamento assumido pela dureza superficial ao longo das amostras submetidas ao ensaio de fresamento FBSF.

O comportamento assumido pela variável de saída analisada, dureza superficial, é muito irregular tornando mais difícil a tarefa de associação dos resultados medidos a um tipo de tendência assumida pela dureza superficial das amostras submetidas ao ensaio FBSF.

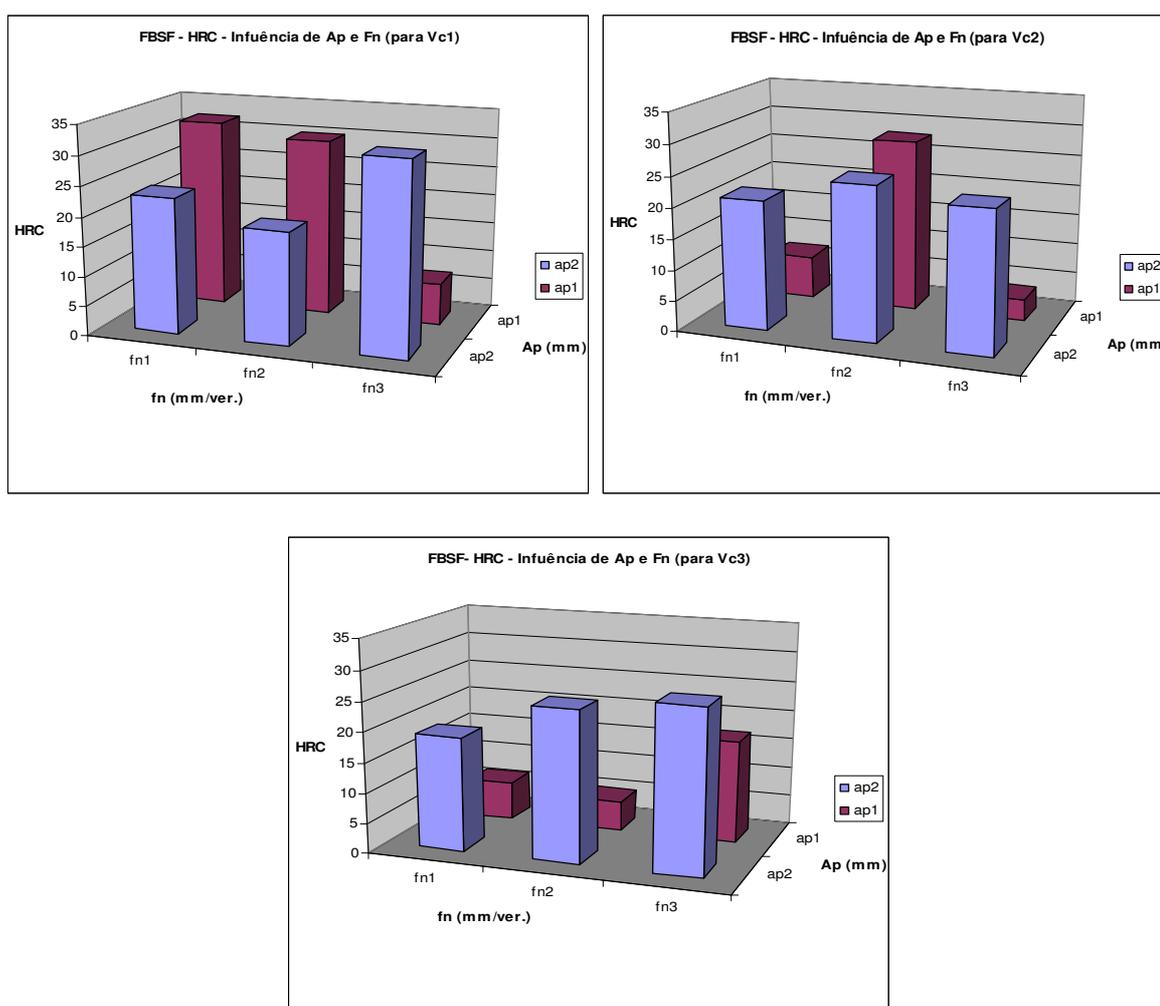


FIGURA 67: RESULTADO DA ANÁLISE DE HRC ENSAIO FBSF

Tomando-se como base os efeitos gerados pela variação da V_c , nos resultados analisados, podem ser identificados, ao se confrontar os três gráficos da Figura 67. Percebe-se, também, uma grande flutuação nos valores medidos, principalmente no que se refere à alteração do estado inicial de dureza, apresentado pelo material das amostras, sendo que em média os valores sofreram uma variação na ordem de 15 HRC.

A V_c promove alterações que, na média, conduzem a uma espécie de tendência no comportamento dos resultados analisados, sendo que com o aumento da intensidade do valor da V_c utilizada, as respostas conseguidas são de valores obtidos com a dureza superficial menores. Desta forma, para este ensaio, na medida em que se aumentou a V_c obteve-se menores valores de dureza superficial.

Ao analisar a influência da profundidade de corte sobre o comportamento de dureza superficial constata-se que de nove possíveis comparativos diretos entre as amostras analisadas, podem ser identificadas seis situações em que com o valor maior de a_p se obteve menores valores de dureza superficial, sendo que entre os três comparativos, um se mostra pouco significativo (diferença de 1 HRC) e outros dois apresentam comportamentos opostos.

Mesmo com a não existência de um comportamento de único de tendência, quando analisado numa demonstração gráfica, pode-se dizer que a variável de saída aqui analisada, sofre alterações inversamente proporcionais ao parâmetro de profundidade de corte. Esta resposta ganha maior credibilidade ao se fazer uma análise das médias obtidas em cada um dos grupos de amostras sendo que:

- ✓ Grupo de V_{c1} – a_{p1} = 23 HRC e a_{p2} = 24,8 HRC;
- ✓ Grupo de V_{c2} – a_{p1} = 12,8 HRC e a_{p2} = 23 HRC;
- ✓ Grupo de V_{c3} – a_{p1} = 9,5 HRC e a_{p2} = 23,7 HRC.

Isto garante a a_p , uma importância considerável em função de sua contribuição no controle da integridade superficial das amostras submetidas a ensaios com características de processos similares as utilizadas no ensaio FBSF.

O avanço promove alterações nos resultados obtidos nas análises realizadas, mas o que se percebe é uma forte relação do avanço com a V_c , sendo que ao confrontar, de maneira conjunta, os resultados indexando com os conjuntos formados pela separação das velocidades de cortes V_{c1} , V_{c2} e V_{c3} , o que se obtém são comportamentos adversos; para cada uma das V_c 's, os resultados apresentados seguem tendências diferentes. Este comportamento de tendência diferente pode ser sentido, até mesmo numa análise numérica sobre as médias das durezas extraídas cada um dos grupos.

A variação do parâmetro de avanço pode promover alterações sobre a variável de saída analisada, em proporções consideráveis. Tais ocorrências são compartilhadas com a variação da V_c , o que torna um ponto interessante de controle a correta seleção desta combinação de parâmetro, que quando bem realizada pode promover características, desejadas ou indesejadas, dependendo da aplicação da peça ou componente em questão.

O processo de fresamento se mostrou através dos resultados obtidos no ensaio FBSF, como sendo um processo de usinagem no qual todas as variáveis de entrada utilizadas promoveram algum tipo de variação nos resultados.

5.4.4. ANÁLISE DE DUREZA SUPERFICIAL NO PROCESSO DE FURAÇÃO

Nos gráficos da Figura 68 podem ser observados os resultados de dureza superficiais, obtidos nas amostras submetidas ao ensaio do processo de furação (FUBSF), estes gráficos sinalizam o comportamento assumido pela variável de saída aqui analisada.

No ensaio FUBSF, ao analisar-se graficamente o comportamento dos valores das durezas superficiais obtidas, fica evidente a grande influência nos resultados, promovida pelo parâmetro de corte D/P, ou seja, sinaliza a existência de uma forte ligação entre a integridade superficial das peças confeccionadas, submetidas a condições similares às aqui apresentadas, e a relação entre a profundidade do furo usinado e o diâmetro da broca utilizada.

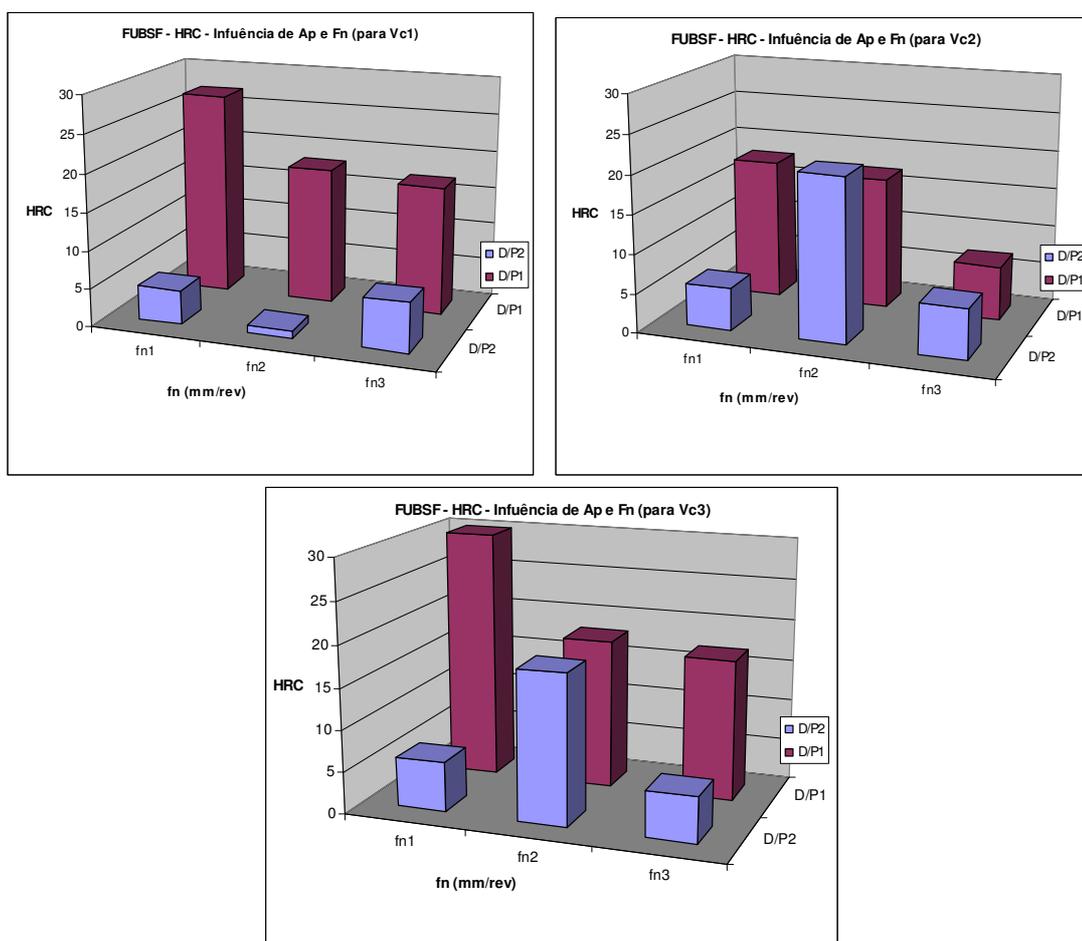


FIGURA 68: RESULTADO DA ANÁLISE DE HRC ENSAIO FUBSF

Esta ligação pode ser mais bem reforçada ao se confrontar tal comportamento com as médias aritméticas destes valores de dureza, fixando tais resultados aos grupos de medidas relacionados a mesma D/P para cada um dos gráficos. Identifica-se, assim, não o comportamento assumido pela D/P, mas qual a relação da

ocorrência de tais fenômenos com o parâmetro de V_c . Os valores médios obtidos variam conforme segue abaixo:

✓ Para V_{c1} – o valor médio da dureza superficial apresentado pelas amostras para $D/P1 = 20,6$ HRC e para $D/P2 = 4$ HRC.

✓ Para V_{c2} – o valor médio da dureza superficial apresentado pelas amostras para $D/P1 = 14$ HRC e para $D/P2 = 11$ HRC.

✓ Para V_{c3} – o valor médio da dureza superficial apresentado pelas amostras para $D/P1 = 21,67$ HRC e para $D/P2 = 9,83$ HRC.

Ao analisar o comportamento assumido pelas medidas de dureza superficial apresentado nas amostras, em relação à V_c , nota-se uma variação entre os valores de máximo e mínimo em torno de 7 HRC tanto as amostras usinadas com $D/P1$ quanto para $D/P2$. Dentre os valores medidos (18 amostras) em apenas três dessas amostras foram encontrados valores superiores a dureza inicial do material e os outros valores medidos nas amostras se alternam em inferiores aos apresentados inicialmente (8 amostras); o restante das amostras apresentam valores similares aos valores iniciais. Embora não tendo apresentado um comportamento de tendência direta nos resultados medidos, nota-se a ocorrência de oscilação entre os valores medidos.

O avanço de corte (f_n) demonstrou-se como sendo um parâmetro que influencia os resultados de dureza superficial obtidos. Sendo que para valores de D/P maiores ($D/P1$) as amostras passam a assumir uma espécie de tendência em função do avanço utilizado, ou seja, quando se reduz o valor do avanço utilizado se obtém valores de dureza superficiais menores, dando início ao que seria uma tendência diretamente proporcional entre a variável de entrada e a variável de saída. Já para as amostras confeccionadas com $D/P2$ os valores passam a assumir um comportamento aleatório com relação às alterações apresentadas.

Desta forma, para o ensaio FUBSF dentre os parâmetros de corte utilizados a D/P demonstrou-se um dos parâmetros mais relevantes em prover alterações nos resultados, podendo, portanto, ser apontado como um dos parâmetros de corte mais crítico em situações similares as apresentadas no presente ensaio. Isso exige uma maior atenção no momento da atribuição de seus valores, objetivando menores interferências à integridade superficial das peças usinadas.

5.5. ANÁLISE DE MICRODUREZA

O ensaio de microdureza mostra como se comportou a microestrutura da superfície e subsuperfície das amostras ao longo dos ensaios realizados. Para melhor entendimento sobre tal comportamento apresentam-se ao longo do texto alguns gráficos plotados com os resultados análise, medidos em HV02 e convertido para HRC. Nesses gráficos uma das observações que se faz é o comparativo entre a microdureza do material da amostra, medida em regiões afastadas da superfície (núcleo) das amostras com as medidas extraídas das superfícies e subsuperfícies; onde a medida denominada aqui como medida do núcleo aparece nos gráficos em forma de uma reta sobrepondo os dados das análises, esta dureza por sua vez variou numa faixa entre 31-33 HRC para os CPs no estado Beneficiado e entre 51-53 HRC para os CPs no estado Temperado/Revenido, divergindo um da dureza inicial extraída na superfície destes corpos momentos antes do ensaio.

5.5.1. ANÁLISE DE MICRODUREZA NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

No gráfico da Figura 69 pode ser observado o comportamento assumido pelas medidas de microdurezas obtidas nas análises, estes valores referem-se às amostras submetidas ao ensaio de torneamento TBSF.

Neste gráfico são apresentados os comportamentos de microdureza ao longo da subsuperfície das amostras, pertencentes ao conjunto de amostras confeccionadas com a V_c3 (120m/min), embora não apresentados os gráficos dos outros conjuntos de amostras (V_c1 e V_c2), vale ressaltar a ocorrência de comportamentos muito similares ao apresentado.

Pode ser observado que, em média, o comportamento assumido pelas amostras em geral foi uma redução da dureza, redução esta que variou de 9 a 2 HRC em relação a medida obtida no núcleo da amostra, sendo que nos pontos (0,01 e 0,02mm) mais próxima da superfície das amostras foram os pontos onde apresentaram os maiores índices de redução. Este comportamento de redução de dureza encontrado se manteve até os pontos 0,05 e 0,06mm das amostras, passando a atingir medidas próximas a medida do núcleo, estabilizando, assim, as alterações geradas pelo ensaio.

A V_c se mostrou pouco influente, no comportamento assumido pela microdureza das amostras e nos três conjuntos de V_c analisados, o comportamento assumido foi muito próximo, ou seja, manteve a mesma redução de dureza em relação à medida do núcleo; os pontos de menor dureza foram os dois mais próximos da superfície e atingiram a estabilização da dureza próxima aos pontos 0,05 e 0,06mm.

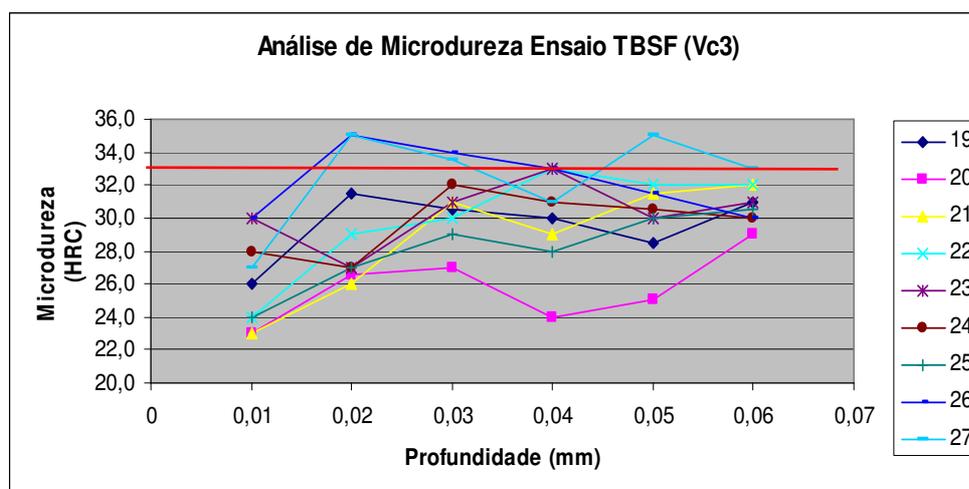


FIGURA 69: ANÁLISE DE MICRODUREZA ENSAIO TBSF ($V_c 3$)

O gráfico apresentado na Figura 70, demonstra o comportamento assumido pela microdureza das subsuperfícies das amostras analisadas submetidas ao ensaio de torneamento TBCF. Percebe-se, nestes resultados, a ocorrência de acréscimo dos valores de dureza encontrados nestas amostras, em relação a dureza do núcleo do material. Este acréscimo no valor da dureza é percebido, tanto para o gráfico que representa o comportamento das amostras confeccionadas com $V_c 1$ (80 m/min), quanto para os outros gráficos ($V_c 2$ e $V_c 3$).

O comportamento de elevação dos valores de dureza medidos pode ter grande participação da condição de lubri-refrigeração, uma vez que a única diferença na condição de corte, entre este ensaio e o ensaio representado pelo gráfico da Figura 69 é a utilização do fluido de corte.

Além da alteração de comportamento proporcionada pela adição do fluido de corte pode ser percebidas, ao longo dos resultados, oscilações direcionadas à variação do avanço e da profundidade de corte, tanto para o ensaio TBSF quanto para TBCF.

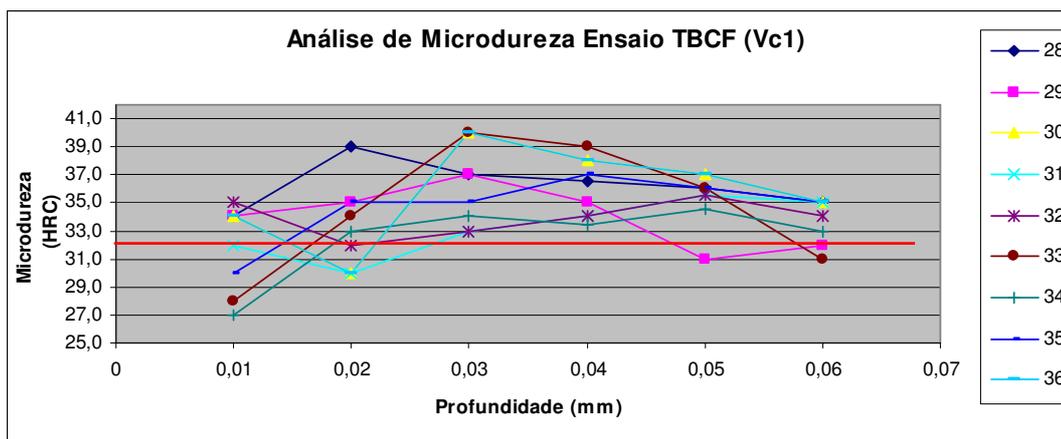


FIGURA 70: ANÁLISE DE MICRODUREZA ENSAIO TBCF ($V_c 1$)

Os gráficos da Figura 71 apresentam os comportamentos assumidos pela análise de microdureza dos ensaios de torneamento TTST e TTCF, os resultados destes ensaios são discutidos simultaneamente, devido a grande similaridade apresentada pelo comportamento assumido pelos resultados das análises.

Nota-se uma elevação nos valores de dureza encontrados nas subsuperfícies analisadas, esta alteração de comportamento de dureza se repete em todos os conjuntos de amostras destes ensaios. Este comportamento desvincula a adição do fluido de corte, a promoção de grandes alterações na variável analisada.

O avanço e a profundidade de corte são responsáveis por boa parte das oscilações apresentadas na análise de microdureza desenvolvida, estas oscilações apresentadas, mostram variações, entre os picos de valores de máximo e mínimo, na ordem de 20 HRC.

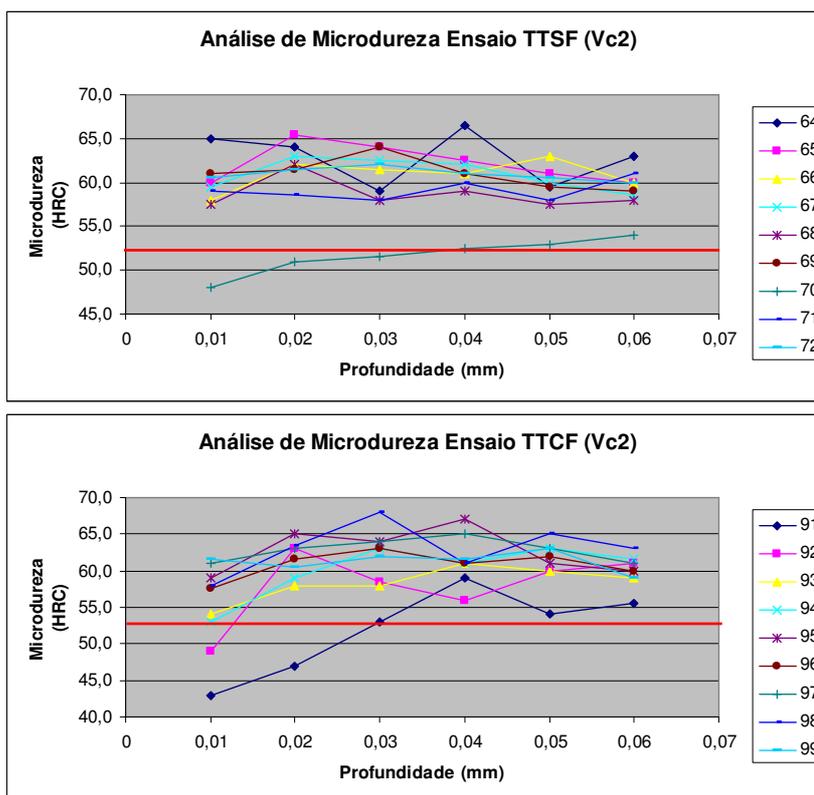


FIGURA 71: ANÁLISE DE MICRODUREZA NO ENSAIO TTSF E TTCF ($V_c 2$)

Os valores da análise de microdureza apresentado por este ensaio mostram medidas em média 10 HRC superiores a medida encontrada na região do núcleo da amostra, os valores de microdureza encontrados tendem a estabilizar-se em regiões próximas a profundidade de 0,07mm.

5.5.2. ANÁLISE DE MICRODUREZA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

No gráfico apresentado na Figura 72 pode ser visualizado o comportamento assumido pela análise de microdureza realizadas na amostras submetidas ao ensaio de retificação RTCF, confeccionadas com profundidade de corte a_{p1} (0,75mm). O comportamento assumido pelas amostras confeccionadas com a_{p2} (0,5mm) apresentou grandes similaridades nos resultados obtidos com a utilização de a_{p1} ,

sinalizando a existência de baixa influência deste parâmetro de corte sobre a oscilação de comportamento da variável analisada.

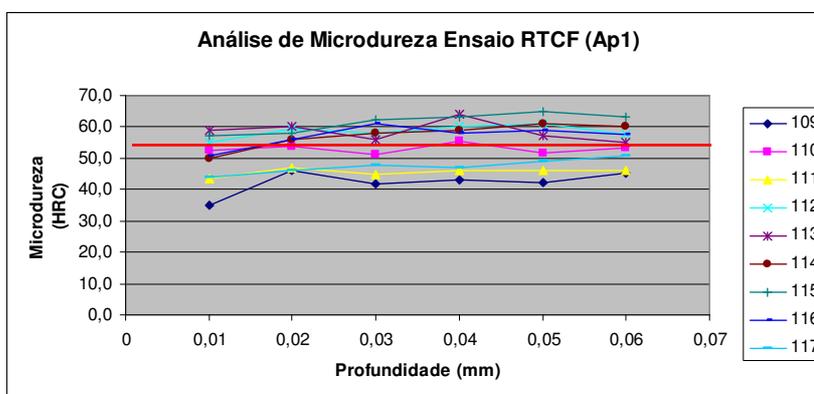


FIGURA 72: ANÁLISE DE MICRODUREZA NO ENSAIO RTCF (A_p 1)

Os valores de microdureza identificado nos conjuntos de amostras analisados oscilaram, em média, em torno do valor de dureza encontrada no núcleo da amostras, sendo que os valores se apresentaram divididos entre superiores e inferiores ao valor de dureza do núcleo.

A variação entre os valores de máximo e mínimo analisados não ultrapassaram a faixa de 20 HRC, divididos entre 10 HRC para dureza superior à dureza do núcleo e 10 HRC para durezas inferiores.

O avanço se mostrou, para este ensaio, pouco influente promovendo leves flutuações entre os resultados e não contribuiu para a formação de tendências comportamentais nos resultados.

A variação da V_c se mostra influente nos resultados promovendo variações entre valores medidos, levando a dureza das superfícies analisadas, a patamares de valores superiores e inferiores a dureza encontrada no núcleo das amostras.

5.5.3. ANÁLISE DE MICRODUREZA NO PROCESSO DE FRESAMENTO

No gráfico da Figura 73 pode ser observado o comportamento assumido pela microdureza ao longo da análise desenvolvida nas amostras submetidas ao ensaio de fresamento FBSF.

Percebe-se que dos valores encontrados a grande maioria deles sofreu acréscimo do valor de dureza em relação a dureza encontrada no núcleo da amostra.

Tanto para profundidade a_{p1} quanto para a_{p2} o comportamento assumido pelas medidas de dureza encontradas ao longo das amostras analisadas, em função de profundidade de corte se mostrou pouco intensa mostrando entre um resultado e o outro ponto de grande similaridade entre as análises.

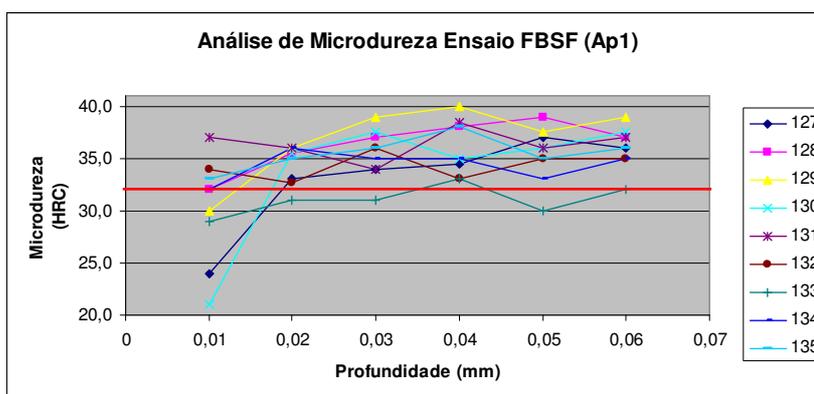


FIGURA 73: ANÁLISE DE MICRODUREZA NO ENSAIO FBSF (A_{p1})

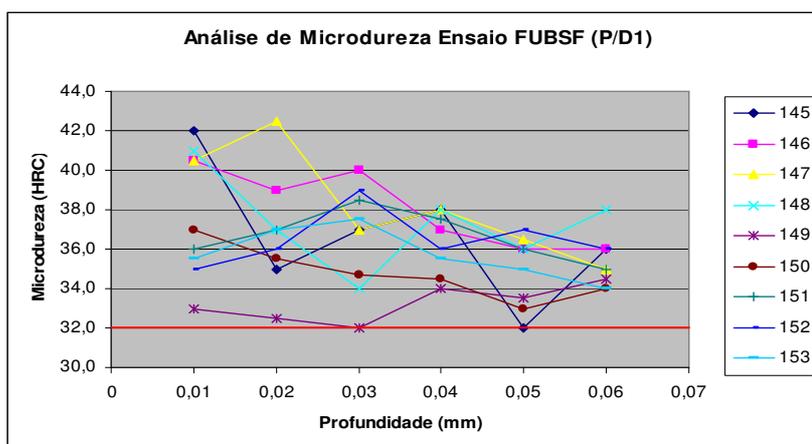
O avanço por dente demonstrou-se consideravelmente influente no comportamento da variável analisada, sendo que a variação entre os valores de V_c pode proporcionar na subsuperfície da amostra variações no comportamento da dureza.

5.5.4. ANÁLISE DE MICRODUREZA NO PROCESSO DE FURAÇÃO

A *Figura 74* apresenta os gráficos dos resultados da análise de microdureza realizado nas amostras do ensaio de furação FUBSF. Nele pode ser observado o comportamento assumido pelas microdurezas das subsuperfícies das amostras analisadas.

A relação D/P exerceu influência, de maneira significativa, nos resultados da análise de microdureza, sendo que o comportamento assumido pelas amostras confeccionadas variou muito em função da D/P escolhida para o ensaio. As amostras submetidas aos ensaios cuja relação D/P utilizada foi a D/P1, obtiveram como resultados na totalidade superiores aos medidos no núcleo da amostra e ainda apresentaram indícios de tendência decrescente da microdureza nas amostras analisadas.

Enquanto que os resultados das amostras confeccionadas com a relação D/P2 apresentaram alguns valores de dureza inferiores a medida de dureza apresentada no núcleo das amostras e ainda sinalizaram uma tendência crescente dos valores de dureza medidos, se opondo a situação encontrada no ensaio que utilizou a relação D/P1.



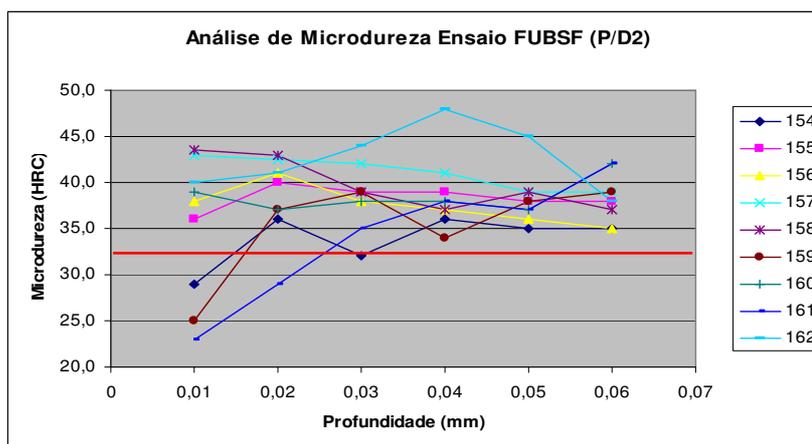


FIGURA 74: ANÁLISE DE MICRODUREZA ENSAIO FUBSF ($D/P1$ E $D/P2$)

A V_c influencia pouco no comportamento das microdurezas analisadas para este ensaio, promovendo pequenas flutuações no comportamento da microdureza, em relação à variação de seus valores de V_c (V_{c1} , V_{c2} e V_{c3}).

Estas variações assumem caráter aleatório, não sendo possível, desta forma, atrelar a este parâmetro nenhum tipo de tendência no comportamento registrado pela variável de saída analisada.

Para operações de usinagem com características similares às utilizadas no ensaio FUBSF a definição da relação D/P deve ser muito criteriosa visando preservar a integridade superficial da peça usinada.

6. CONCLUSÃO

A identificação das influências dos parâmetros de corte sobre a integridade superficial das peças submetidas aos processos de usinagem pode ser uma ferramenta importante para a confecção da peça, pois é possível que sejam conferidas características desejadas nas peças, de acordo com as exigências a que são expostas em campo, como por exemplo, uma peça que trabalhe constantemente solicitada a esforços de fadiga pode, no momento de sua confecção, ser submetida a condições de usinagem que introduza tensões residuais compressivas em sua superfície e subsuperfície, condicionando-a e/ou adequando-a ao cenário de atuação, propiciando, assim, maior longevidade ao componente.

A escolha por uma única variável dependente de saída a ser monitorada, pode conduzir os resultados das análises a conclusões equivocados sob a real condição da integridade superficial apresentada pela peça após usinagem.

Mesmo em condições de usinagem tidas como menos severas, utilizadas em alguns ensaios, a integridade da peça sofreu algum tipo de dano em pelo menos uma das variáveis de saída analisadas, reforçando a importância de se realizar análise conjunta entre as possíveis variáveis de saída existentes, no sentido de obter maior controle em relação as possíveis alterações sofridas na superfície da peça.

Correta identificação da intensidade do efeito gerado pelas variáveis de entrada podem levar a melhorias consideráveis nos resultados esperados com o processo de usinagem, tanto no tocante da redução dos custos operacionais quanto em questões ligadas a qualidade dos produtos e componentes.

O avanço de corte (f_n e f_z) foi o parâmetro de usinagem que mais demonstrou influenciar nos resultados das análises, de uma maneira geral, em todos os ensaios realizados. Para algumas das análises, esta influência se sobressai de forma clara e direta, enquanto para outras análises ela pode se apresentar de maneira sutil; contudo, esta flutuação promovida pela variação do avanço se faz presente em todas as análises de todos os ensaios.

As alterações percebidas ao longo dos resultados analisados, não assumiram comportamentos tendenciosos e lineares, dificultando a tarefa de interpretação e projeção de possíveis resultados esperados.

Fenômenos ligados a integridade superficial de peças submetidas aos processos de usinagem vão aparecer com certa frequência; a função de identificar e quantificar estas variações, como sendo características benéficas ou maléficas à peça, está diretamente condicionada a aplicação que será submetida a peça ou o componente.

A correta determinação dos parâmetros de corte no processo de usinagem está diretamente relacionada a vários resultados e características almejadas, dentro do contexto dos processos de usinagem, e a integridade superficial das peças se mostrou como sendo uma delas. Ou seja, os parâmetros de corte são os grandes responsáveis pela condição de integridade apresentada na superfície e subsuperfície de peças usinadas.

Visando melhor entendimento sob os resultados obtidos com a presente pesquisa, apresenta-se de forma individual a conclusão extraída dos resultados de cada processo de usinagem utilizada:

✓ PROCESSO DE TORNEAMENTO

As peças confeccionadas com o processo de torneamento, em todas configurações utilizadas nos ensaios aqui analisados, apresentaram-se susceptíveis a ocorrência de fenômenos ligados a integridade superficial.

Das variáveis de saída dependentes exploradas a de maior destaque foi a rugosidade superficial (R_a) atrelada ao parâmetro de corte f_n , onde pode-se verificar uma projeção dos valores de rugosidade superficial diretamente proporcional ao acréscimo dos valores de f_n .

A influência da utilização ou não da lubri-refrigeração, nos ensaios de torneamento, mostrou-se pouco relevante e, em alguns casos, apresentou-se de maneira pouco interessante, principalmente quando atua como acelerador da severidade de resfriamento das regiões das peças termicamente afetadas, fato que pode ser claramente identificado quanto observado os gráficos das *Figura 69* e *Figura 70*, nos quais apresenta-se o comportamento assumido pelas medidas de dureza, das superfícies e subsuperfícies, desenvolvidas na análise de microdureza.

A variável dependente de saída que mais demonstrou ser influenciada no processo de torneamento foi a CAC principalmente em condições de corte otimizadas, estas peças apresentaram, guardando as devidas proporções, alterações térmicas e mecânicas, de forma combinada e isoladamente.

A variável independente de entrada que mais se demonstrou influenciar nos resultados aqui analisados foi f_n que além de se destacar pelos efeitos que são nitidamente provocados por ele, acaba tendo forte participação nas alterações direcionadas a outras variáveis.

O processo de torneamento, demonstrou-se como um processo no qual deve direcionar atenção redobrada na escolha dos parâmetros de corte a serem utilizados durante a execução das peças, em casos onde não se permite tal flexibilidade de

escolha dos parâmetros de corte, deve-se adotar critérios pós-usinagem, como tratamentos térmicos, alívios de tensões ou análise mais detalhadas, visando restabelecer as características desejadas nas peças e/ou componentes em campo.

✓ **PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Os resultados apresentados pelas análises desenvolvidas das variáveis de saída, nas peças obtidas pelo processo de retificação podem ser observados a existência de uma forte influência destes resultados no comportamento de vida destas peças em trabalho.

A variável dependente de saída que mais se demonstrou ser influenciada no processo de retificação foi o comportamento da dureza superficial medida antes e após o ensaio apresentando consideráveis reduções nos valores obtidos e um paralelo com o comportamento da microdureza que em algumas amostras apresentou a mesma característica de redução no valor medido pode-se observar na subsuperfície esta redução em profundidades de camadas superiores a 0,06 mm.

A variável independente de entrada que mais se demonstrou influenciar nos resultados aqui analisados foi o a_p por representar maior tempo de contato da ferramenta com a peça propiciando um ambiente favorável a elevação da temperatura da superfície que conseqüentemente reflete em alterações térmicas à integridade superficial das peças.

A qualidade da integridade superficial das peças submetidas ao processo de retificação está diretamente ligada ao sobre-metal e a profundidade de corte estabelecida ao processo, com isto fica a preocupação em função da quantidade de material removido por passada influenciando na característica de eficiência do processo.

Para o processo de retificação, é de fundamental importância a agressividade apresentada pela superfície cortante do rebolo, esta característica foi analisada em

paralelo ao trabalho, junto a ensaios complementares, nos quais notou-se nela um fator que pode ser considerado como um agravante nas condições da integridade superficial das peças.

Outra característica de processo que deve ter um acompanhamento diferenciado e o tempo de *spark-out*, este tempo quando bem dimensionado pode melhorar ou em alguns casos eliminar características indesejáveis ligadas a integridade superficial das peças.

✓ **PROCESSO DE FRESAMENTO**

O processo de fresamento se mostrou como sendo um processo onde não se constatou significativas alterações, pelo menos para o cenário adotado para o ensaio aqui desenvolvido, as poucas alterações apresentadas apareceram de forma desordenada e sem nenhuma tendência aparente.

A variável dependente de saída que mais se demonstrou ser influenciada no processo de fresamento foram às alterações de comportamento apresentado pelos valores de tensão residuais das encontrados na superfície e subsuperfície das amostras analisadas. Atingindo em situação extremas a estados de tensão residual do tipo trativas.

A variável independente de entrada que mais se demonstrou influenciar nos resultados aqui analisados foi o parâmetro de corte de V_c o qual apresenta-se como responsável pelas alterações na integridade superficial ligadas ao estado de tensão residual das amostras.

O avanço por dente demonstrou-se consideravelmente influente no comportamento da variável dos valores de microdureza analisados, sendo mais evidenciados quando combinados a valores de V_c de maior intensidade podendo gerar na subsuperfície da amostra um perfil de variações no comportamento da dureza medido.

✓ PROCESSO DE FURAÇÃO

O processo de furação se demonstrou como sendo um processo onde existe a efetiva formação da CAC, as operações deste processo quando utilizado em condições otimizadas de corte, o resultado será quase que na totalidade peças com alterações em sua integridade superficial. Algumas destas alterações também puderam ser observadas em cenários onde as condições de corte consideradas menos otimizadas.

A variável dependente de saída que mais se demonstrou ser influenciada no processo de Furação foi justamente a CAC onde dentre os resultados dos processos analisados foram os resultados onde se encontraram os maiores valores de profundidades de CAC analisados.

Atrelado a esta característica da CAC se destaca a análise da variável de microdureza no qual pode-se observar um comportamento único de elevação do valor medido de dureza em todas as amostras analisadas.

A variável independente de entrada que mais se demonstrou influenciar nos resultados aqui analisados foi a V_c , pois este processo apresenta certa complexidade em relação a este parâmetro, uma vez que se trabalha no mesmo momento com V_c diferentes para diferentes regiões a serem usinadas da mesma peça.

O f_r exerce uma forte influência nos resultados obtidos com o ensaio de furação pois pode exercer um forte efeito de conformação no momento da execução da usinagem do furo no material do material, provocando um espécie de esmagamento do cavaco contra a superfície da parede furo, inserindo tensões e alterando a estrutura do material de forma não controlada.

A relação D/P nos resultado analisados apresentaram certa influencia negativa, principalmente nas variáveis de saídas ligadas ao comportamento de dureza tanto na dureza superficial como na microdureza este parâmetro de corte

exerce papel decisivo na integridade da superfície e subsuperfície das peças confeccionadas por este processo.

O fenômeno provocado pelo f_n também, em alguns casos, pode elevar a temperatura de contato ferramenta peça e trabalhar como um facilitador na formação de alterações térmicas no material, que em boa parte dos casos

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Segue alguns temas como sugestão para futuros trabalhos visando a abordagem a assuntos relacionados ao tema central do trabalho apresentado:

- ✓ Estudo dos efeitos dos parâmetros de corte em condições otimizadas sobre o comportamento da integridade superficial de peças usinadas.
- ✓ Utilização de ferramental estatístico na interpretação dos fenômenos ocorridos em peças usinadas.
- ✓ Estudo do comportamento de peças usinadas em ensaios de fadiga, visando a identificação de condições de corte que aumentem sua longevidade.
- ✓ Estudos dos parâmetros de retificação na integridade de peças cementadas, temperadas e revenidas.
- ✓ Sistema especialista definindo condições de usinagem que possibilitem a manipulação das características superficiais de peça conforme sua aplicação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A.M. **Sistema para Avaliação de Desempenho Térmico de Pares Rebolo-Peça em Retificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

ABRÃO, A. M.; ASPINWALL, D. K. **The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel**, Wear n°196, Ed: Elsevier Science S.A. 1996, p. 179-284.

ALVAREZ, R. J. F. **Avaliação da Integridade da Superfície no Torneamento de um ferro Fundido Nodular com Carboneto**. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 138p.

ASTM, E 384-99. **Standard Test Method For Microindentation Hardness Of Materials**. 1999, p. 409 – 424.

BECKER, M.; SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Tecnologia Avançadas de Manufatura**. Coleção Fábrica do Milênio Vol. 1, Cap. 6 - Integridade Superficial em Usinagem, Jaboticabal: Novos Talentos, 2005, p. 105-125.

BORDINASSI, E. C. **Contribuição da Integridade Superficial de um aço inoxidável Super-Duplex Após Usinagem**. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. 221 p.

BRINKSMEIER, E.; CAMMETT, J. T.; KONING, W.; LESKOVAR, P.; PETERS, P. TONSHOFF, H. K. **Residual Stresses – Measurement and Causes in Machining Processes**. Annals of the CIRP Vol. 31/02/1982. Manufacturing Technology – Annals of the international Institution for Production Engineering Research. 1982, p.491- 507.

CAMPOS, M. F.; MACHADO, R.; HIRSCH, T. **Tensões Residuais em Aços Avaliadas por Difração de Raio-X**: Diferença entre micro e macro tensões residuais. 3º Workshop de Textura, 4 a 5 de setembro de 2006, São Paulo SP.

CATAI, R. E.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; MATOSKI, A. CERRI, J. A. Como a Variação do Fluido de Corte Influencia as Circularidades, Tensões Residuais e microestrutura do aço V_c 131. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil **Máquinas e Metais**. Ano XLIV nº502 – Nov. São Paulo: Aranda, 2007, p. 158-169.

CIMM. Disponível em <http://www.cimm.com.br>. Acesso em 5 Ago 2008.

DAMASCENO, D. **Análise das Tensões Residuais Após Torneamento e Retificação do Aço ABNT 52100 Endurecido**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993, 97p.

DEGARMO, P. E. **Material And Processes In Manufacturing**. Ed. Macmillan Publishing. Printed in the United States Of America, 1997. Fifth edition, 857p

DELIJACOV, S.; BORDINASSI, E. C.; LIMA, N. B.; AGUIAR, J. B.; BATALHA, G. F. Modelagem das Tensões Residuais no Torneamento de Um Aço DIN 100 CRMn6, **Máquinas e Metais**. Ano XLIV nº505 – Fev. São Paulo: Aranda, 2008, p. 74 - 98.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. New York: MacGraw-Hill, Inc., 1961-1976. 248p.

DINIZ, A. E; COPPINI, N. L; MARCONDES, F. C. **Tecnologia de Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Art Liber Editora, 1999. 244 p.

FUSSE, R. Y. **Estudo Comparativo entre Lubri-refrigeração Convencional e a MQL no processo de retificação Cilíndrica Externa de Mergulho**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Industrial. Faculdade de Engenharia da UNESP. Bauru, 2005, 118p.

GASPAR, M.C.; CAPELA, C.; BOLRÃO, J. **Surface topography characterization techniques on moulding areas of injection moulds**. Semana de moldes de Portugal, Proceedings of RPD - Rapid Product Development. 2004.

GIL, A. C. **Como elaborar Projetos de Pesquisa**. 4° ed. São Paulo: Atlas, 2002.

HIOKI, D. **Influência dos Parâmetros de Corte Do Fresamento HSM Sobre o Desempenho Tribológico do Aço AISI H13 Endurecido**. Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo – SP, 2006. 232p

JACOBSON, M.; DAHLMAN, P.; GUNNBERG, F. Cutting Speed Influence on Surface Integrity of Turned Bainite Steel. **Jornal of Materials Processing Technology** 128 (2002) Ed. Elsevier. p. 318-323

LECANDA, E.; EGANA, I.; ZALAIETA, O. HERNÁNDES. J. Uma Nova Forma de Caracterizar a Rugosidade Superficial no Fresamento de Topo. **Máquinas e Metais**. Ano XLIV n°504 – Jan. São Paulo: Aranda, 2008, p. 86-105.

LIMA, F. E. **Características do Processo de Torneamento de Materiais Endurecidos**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2001. 150 p.

LIMA, A. **Estudo dos Macro e Micro Determinantes de Qualidade (MmdQ) de Peças em Processo de Furação Otimizado**. Dissertação (Engenharia De Produção) Faculdade De Engenharia Mecânica E De Produção. Universidade Metodista De Piracicaba – UNIMEP. Santa Bárbara d'Oeste, 2002, 145 p.

LIMA, A. VIEIRA, M.; Brief Study of Macro Quality Determinats of Pieces Obtained From Optimized Drilling Process. **Anais do VI Encontro de Mestrando em Engenharia**. São Pedro, 17 a 19 de maio de 2002.

LIMA, A. VIEIRA, M.; LIBARDI, R; CANCELIERI, H. A. Estudo dos Macro e Micro Determinantes de Qualidade de Peças Sinterizadas Submetidas ao Processo de Retificação. **Anais do XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP**. Salvador, 17 a 19 de outubro de 2001.

LIMA, A.; VIEIRA JUNIOR, M. Study of Macro and Micro Quality Determinants of Pieces Obtained from Optimized Drilling Process. In: Sixth International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology - AMST`02, 2002, Udine-Italy.

Anais Of Sixth International Conference on Advanced Manufacturing Systems and Technology - AMST`02. Udine - Italy : Elso Kuljanic, 2002. p. 179-185.

LOPES, R. H. S.; SOUTO, U. B.; SILVA, M. B. **Estudo do Desgaste de Ferramenta de Corte e Rugosidade Superficial com o Auxílio da Emissão Acústica no Fresamento**. Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem, LEPU. Uberlândia, MG. Disponível em http://www.propp.ufu.br/revistaeletronica/Edicao%202006_1/C/rodrigo_henrique.pdf. Acesso 20 nov 2007.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais**. 7a. versão, Universidade Federal de Uberlândia, p 1;222-233;161-172, 2000.

MALKIN, S. Grinding Mechanisms e Grinding Temperatures and Thermal Damage, In: **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives**. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1989. Cap. 5 e 6, p.108 a 171.

MARIN, J. M. **Mechanical Behavior of Engineering Materials**. EUA: Prentice – Hall, Inc., 1960. 318p.

MATEOS, A. G. **Tolerâncias e Ajustes**. Trad. A.C. Neiva. São Paulo: Polígono, 1974. p161 – 405.

MONICI, R. D. **Análise da mínima quantidade de refrigeração e da refrigeração convencional no processo de retificação em aços endurecidos**. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Bauru, SP, Brasil, 2003, 171p.

NOVASKI, O. J. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1994, 119p.

_____. _____. São Paulo: Edgard Blucher, 1998, p. 47-80.

NOVASKI, O. J.; RIOS, M. **Vantagens do Uso de Fluidos Sintéticos na Usinagem**. Disponível em <http://www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos>, Acesso 23 nov 2001.

OGATA, H. T. S. **Determinação da Influência das Tensões Residuais nas Propriedades de Fadiga em Aço Sae 8620 Processado com Diferentes**

Profundidades de Camada de Cementação. Dissertação (Mestrado) Ciências dos Materiais. Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003, 143 p.

OZEL, T.; KARPAT, Y. **Predictive Modeling of Surface Roughness and Tool Wear in Hard Turning Using Regression and Neural Networks.** Department of Industrial and Systems Engineering, Rutgers, The State University of New Jersey, 96 Frelinghuysen Road, Piscataway, NJ 08854, USA. September 2004.

RECH, J.; KERMOUCHE, G.; KHELLOUKI, A.; GRZELIK, W.; ROSALES, C. G.; ARANZABAL, R. R. Palestra Técnica na 6ª Conferência Internacional de Usinagem a Altas Velocidades (HSM07) San Sebastian (Espanha) **Máquinas e Metais.** Ano XLIV nº502 – Abr. São Paulo: Aranda, 2008, p. 144-181.

RODEIRO, P. F. **Análise de Distribuição de Temperatura e Tensões Residuais em Soldas do tipo Ring-Weld.** Dissertação (Mestrado). Engenharia Naval. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SANTIN, R.; PANOSSO, R. **Análise da Qualidade Superficial em Fresamento Altas Velocidades de Corte de Material Endurecido.** X CREEM, 2003.

SHAW, M. C. **Heat-Afected Zones in Grinding Steel.** Arizona State University, Tempe, AZ, USA. December 16, 1994. Anais: of the CIRP vol. 43/1/1994. p.279-282.

SILVA, S. G., COSTA, I. S., REBELLO, J. M. A., Avaliação do Erro Entre a Técnica do Tempo de Percurso da Onda Difrata – TOFD (Time Of Flight Diffraction) e as Técnicas Convencionais na Inspeção de Cordões de Aços. **XXI Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, 6ª Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos.** Salvador, BA. Agosto, 2002, 8p.

SOUZA, S. A. **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos.** Fundamentos Teóricos e Práticos. São Paulo: Edgard Blucher, 1982, 286p.

SPUR, G.H. C.; TIO, H.T. Danos à Camada Superficial na Usinagem de Cerâmica Avançada. **Máquinas e Metais.** Jan. São Paulo: Aranda, 1991. p 64-72.

SUTERIO, R. **Medição de Tensões residuais por Inentação Associada à Hologafia Eletrônica.** Tese (Doutorado) Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, Brasil e INPE São José dos Campos – SP, 2005. 160p.

TEDESCO, M. E.; TENDARDINI, E. K.; BAUMVOL, I. J. R.; ZEILMANN, R. P. Variação Dimensional e Microestrutural em Peças de aço ASI 4140. **Máquinas e Metais.** Ano XLIV n°502 – Abr. São Paulo: Aranda, 2008, p. 144-181.

VIEIRA, M. **Avaliação da Dureza de Rebolos em Trabalho através do Uso da Emissão Acústica na Dressagem.** Tese (Doutorado) EECC. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996. 131p.

VIEIRA, M.; LIMA, A.; LIBARDI, R.; CANCELIERI, H. A. Análise da Camada Afetada pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas. In: **IV Seminário de Desgaste.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo: Édile, Julho de 1998.p. 183-206.

LIMA, A.; VIEIRA JUNIOR, M. **Identificação da Camada Afetada Pelo Calor (CAC): Comparação Entre os Métodos da Análise de Imagem e da Análise de Microdureza.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2003, Uberlândia. CD e Anais do 2 Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF2003. Uberlândia : Univesidade Federal de Uberlândia, 2003.

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 296p.

BALAKSHIN, B. *Fundamentals of Manufacturing Engineering*. Trad. H. Rozenfeld. **Apostila Laboratório de Ferramentas**, Cap. I-IV, São Carlos, 1983. 194p.

BATZER, S.; SUTHERLAND, J, **The Dry Cure for Coolants Ills**. *Cutting Tool Engineering*, June, 1998, p 34 – 44.

BRAGA, D. U. A. **Técnica de Mínima Quantidade de Fluido de Corte Aplicado No Processo de Furação de uma Liga de Alumínio Silício**. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 177p.

BRAGA, D. U.; DINIZ, A. E.; COPPINI, N. L. **Utilização da Técnica de Mínima Lubrificação por Névoa na Furação da Liga de Alumínio Silício SAE – 323. Usinagem Brasil**. Disponível em <http://www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos>. Acesso 23 nov 2001.

BRAGA, D. U.; DINIZ, A. E.; MIRANDA, G.; COPPINI, N. L. *Minimal Lubrication in the Drilling Process of Aluminum-Silicon Alloy - A356 (SAE 323)*. **Proceedings of the 3rd International Machining and Grinding Conference (SME)** Cincinnati, USA Vol. 1, 1999, p.99 - 236.

CARDOSO, J. C. M. **Estudo de Caso Para a Implantação de Manufatura Classe Mundial e Proposta de Conceito Para Empresa Classe Mundial**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Piracicaba, 2000, 113p.

CHILDS, T. H. C.; ROWE, G. W. **Physics in Metal Cutting**, *Rep. Prog. Physics*, 1973 Vol. 36, p. 223-288.

COPPINI, N.L.; VILELLA, R.C. Cutting Conditions Optimization in Manufacturing Cells. **Proceedings of the First Brazilian Symposium in Machining Technology**, pp. 17/01 - 17/20, São Paulo, Brazil, March 1989.

CRONJAGER, L.; MEISTER, D. **Machining of Fiber and Particle-Reinforced Aluminium**. Annals of the CIRP, v41 (1), p63-66, 1992.

FARAGO, F. T.; CURTIS, M. A. **Handbook of Dimensional Measurement**, Ed. Industrial Press Inc. Third Edition. 1994, 580p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 1977, 751p.

FREIRE, J. M. **Tecnologia Mecânica – Máquinas de Serrar e Furar.**, volume 2. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978, 230p.

GRAHAM, D. **Dry Out**, Cutting Tool Engineering, March, 2000, p 56 – 65.

GRANGER, C. **Dry Machining's Double Benefit**. Machinery and Production Engineering, Vol. 152 (3873), 1994, p. 14-15, 17, 19-20,

GRIFFITH, G. K. **Measuring & Gaging Geometric Tolerances**. New Jersey: Paramount Communications Company Englewood Cliffs, 1994 p 1-301.

HEISEL, U.; LUTZ, M. Pesquisa de fluido de refrigeração e de lubrificação. **Máquinas e Metais**. Maio. São Paulo: Aranda, 1998. p. 40-49

HORNE, J. G.; DOYLE, E.D.; TABOR, D. Direct Observation of Contact and Lubrification at a Chip-Tool Interface. **Proc. Ist. Int. Conf. on Lubrification Challenges in Metal Working and Processing, III Research Institute**, Chicago, Illinois, 1978, USA, 7-9 June, 7p.

JACOBUS, K.; DEVOR, R. E.; KAPOOR, S. G. **Machining – Induced Residual Stress: Experimentation And Modeling**. Transactions Of the ASME – American Society of Mechanical Engineers, Vol. 122, February 2000. p.20-31.

KALHOFER, E. Dry Machining – Principles and Applications. **Anais do 2º Seminário de Alta Tecnologia Usinagem Com Altíssima Velocidade de Corte e Alta Precisão**. Universidade Metodista de Piracicaba, Julho de 1997, Santa Bárbara D'Oeste, São Paulo, 5p.

KAMMERMEIER, D.; BORSCHERT, B.; KAUPER, H.; SCHENEIDER, M. Furação Sem Refrigeração: Somente Razões Ecológicas? . **Metal Mecânica**. São Paulo, ano XVIII, abril/maio 2000, p6269. Disponível em <http://www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos>. Acesso em 05 Nov. 2001.

KLOCKE, F.; EISENBLATTER, G. **Presented at the Opening Session Dry Cutting**, Annals of the CIRP, v. 46 (2), pp. 519-526, 1997.

KONIG, W.; RUMMENHOLLER, S. As Indústrias estão tendo que orientar Ecologicamente seus Processos Produtivos. **Máquinas e Metais**. Vol. 387, p,22-29, Abr. São Paulo: Aranda, 1998.

LIRANI, J. Introdução a Metrologia Industrial. **Apostila**. Publicação 053/87. 1º fascículo. São Carlos, 1985, 78p.

MACHADO, A. R.; SILVA, M.B; WALLBANK, J. Practical Determination of Lubricant Performance in Turning, Submitted to **ASME - Journal of Manufacturing Science and Engineering**, 2000.

MACHADO, A.R.; WALLBANK, J. **The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining**, Wear, vol. 210, N0. 1-2, 1997, p. 76-82.

MACHADO, A.R.; MOTTA, M.F.; DA SILVA, M.B. Performance of Synthetic and Mineral Soluble Oil when Turning AISI 8640 Steel. **ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Vol. 119, No. 4, 1997p 580 – 586.

MELO, A. C. A.; FRANCO, S. D. E.; MACHADO, A. R. Estudo da Formação de Trincas de Origem Térmica no Fresamento, [Study of Thermal Crack Formation in Milling Opeation], **Proceedings of Brazilian National Conference on Mechanical Engineering – CONEM 2000**, 7 - 11 of August, Natal, RN, In CD Rom, 2000, Paper HC 9246.

MIRANDA, G. W. A.; COPPINI, N. L.; BRAGA, D. U.; DINIZ, A. E. Contribuição ao Processo de Furação com Brocas de Metal Duro Revestidas. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF 01**. Abr 2001, Curitiba- pr. CD dos Anais do COBEF 01

MODENESI, P. J. **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. Faculdade de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

MULLER, P. Ferramentas para furar e rosquear com HSC e sem refrigeração. **O Mundo da Usinagem**. São Paulo: Sandvik, Janeiro de 2000. p. 13 a 17.

NAKAGAWA, H. Mínima Quantidade de Lubrificação não Agride o Meio Ambiente. **Maquinas e Metais**. Ago. São Paulo: Aranda, 2000, p 40-49.

PALLEROSI, C. A et al.. Durability of Cutting Tools Under True Conditions, Proceedings of CANSAM 91. **Canadian Congress in Applied Mechanics**. Canada, 1991, p. 173-175.

POSTNIKOV, S. N. Penetrating Ability of Cutting Fluids. **Wear**, Vol. 10, 1967, p. 142-150.

PUC-RIO, 2008. site: http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/cgi-in/PRG_0599.EXE/10462_4.PDF?NrOcoSis=33578&CdLinPrg=pt acessado em 02/03/08.

PUNCOCHAR, D. E. **Interpretation Of Geometric Dimensioning And Tolerancing**. Second edition. Ed. Library of Congress Cataloging in Publication Data, Industrial Press Inc. New Yourk, printed in the United States Of America, 1996. P 1 - 97

RODRIGUES, M. A. P.; ABRÃO, A. M. Derivados do Óleo de Mamona como Fluido de Corte. **Máquinas e Metais**. Vol. 400, p104 – 112. Maio. São Paulo: Aranda, 1999.

SALES, W. F.; MACHADO, A. R.; MELLO, J. D. B. Influência do Fluído de Corte no Desgaste de Brocas de Aço Rápido. **IV Seminário de Desgaste**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo: Édile, Julho de 1998. p. 641 a 658.

SCANDIFFIO, I. **Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço**. Dissertação (Mestrado) Engenharia Mecânica. UNICAMP, Campinas, SP, 2000.

SHAW, M. C.; PIGGOT, J. D.; RICHARDSON, L. P. **The Effect of the Cutting Fluid upon Chip-Tool Interface Temperature**, Trans of ASME, 1951, Vol. 73(1), p. 45 - 56.

SOTO, M. Rumo Ao Novo Milênio Com Ferramentas de Alta Performance. **O Mundo da Usinagem**. Vol. 4, p.10-16. Abr. São Paulo: Sandvik, 2000.

TEIXEIRA FILHO, F.; FERREIRA, J. R.; SANTOS, J. N.; DINIZ, A. E. Utilização de Refrigeração/Lubrificação em Torneamento de Aço Endurecido. **Proceedings of Machining Conference**, São Paulo, SP, 2000, p. 1 - 25.

TRENT, E. M. **Metal Cutting**. 3rd Edition. London: Butterworths, 1991, ISBN 0408108568.

_____. **Conditions of Seizure at the Tool Work Interface**, ISI, Special Report 94, Iron and Steel Institute, London, 1967, p. 11-18.

VIEIRA, M.; ABRÃO, A. M.; DUARTE, M. A. V.; MACHADO, A. R. Influência do Fluido de Corte na Usinabilidade do Aços. [Influence of the Cutting Fluids on Machinability of Steels]. **Proceedings of The XIV Brazilian Conference on Mechanical Engineering - COBEM**, 08 a 12 of December, Bauru, SP. – In CD Rom – Paper No. 1997,COB 915 – T84.

VILELLA, R. C. **Metodologia Prática Visando a Otimização das Condições de Usinagem em Células de Fabricação**. Dissertação (Mestrado) Faculdade de Engenharia. Departamento de Fabricação. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. 104 p,

WADA, R. Há de Haver um Conceito bem Diferente do Atual Para as Máquinas de Amanhã. **Máquinas e Metais**, Vol. 376, p.20-43. Maio. São Paulo: Aranda, 1997.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem das ligas de Alumínio e Suas Ligas**. 2ª. Ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil, 1991.

WILLIAMS, J. A. The Action of Lubricants in Metal Cutting. **Journal Mechanical Engineering Science**, 7 Mech, 1977, E Vol. 19 (5), p. 202-212.

YUHARA, D. A. Furação Com Pastilhas Intercambiáveis de Metal Duro. **Mundo Mecânico**, Vol. 74, p.37-41. Set. São Paulo: Gruenwald, 1982.

10. ANEXOS

Anexo I: Certificado de calibração do durometro (15N)


Quality Control Industrial e Técnica Ltda
 Matriz: Avenida Baruel, 480 - Casa Verde - São Paulo - CEP 02522-000
 CNPJ 58.067.208/0001-08 - I.E. 111.909.813.119
 Filial: Trav. José B. de Camargo, 44 - Itatiba - SP - CEP 13253-421
 CNPJ 58.067.208/0002-99 - CCM 017.062
 PABX: (0**55) 11 3955-1030/FAX: 3599-0889 site: www.qualitycontrol.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 5124/06 Página - 1/2 -

Cliente : LABTESTE ANÁLISE E ENSAIOS DE MATERIAIS
 Endereço : Rua Tupis, 1633 - Distrito Industrial II Santa Bárbara d'Oeste - SP
 Instrumento: Durômetro Marca: Galileo Modelo: n/c
 Nº cliente : n/c Nº identificação: 104049
 Local de inst.: Laboratório

Temperatura ambiente: 26 °C Tolerado por norma 23 ± 5 °C

MÉTODO ROCKWELL SUPERFICIAL

1. VERIFICAÇÃO DE CARGAS

Nominal (Kgf)	Leitura 1 (Kgf)	Leitura 2 (Kgf)	Leitura 3 (Kgf)	Fm (Kgf)	Valor encontrado		Erro max. Permissível por Norma	
					Ee (%)	Erp (%)	Ee ± (%)	Erp ± (%)
3,000	3,225	3,221	3,224	3,223	-7,44	0,12	2,00	0,60
15,000	14,868	14,870	14,869	14,869	0,87	0,01	1,00	0,60

2. PENETRADORES DE MEDIÇÃO
 Penetrador nº: 8374 Desvio dimensional: Cone de diamante 120° ± 20'; raio de 0,2 ± 0,01 mm

3. MEDIÇÃO COM BLOCOS PADRÃO DUREZA

Ensaio (Hr)	HP	Leituras						Valor encontrado		Erro max. Permissível por Norma	
		Hm (Hr)	Erp (Hr)	Ee (Hr)	Erp ± (Hr)	Ee ± (Hr)					
HR 15N	90,45	90,2	90,0	90,2	90,2	90,0	90,12	0,20	-0,33	1,20	2,00
HR 15N	80,48	79,8	80,0	80,2	80,0	80,2	80,04	0,40	-0,44	1,20	2,00
HR 15N	71,08	71,8	72,0	71,8	71,6	71,8	71,80	0,40	0,72	1,20	2,00

SÍMBOLO	FONTE DE INCERTEZA	VALOR - XL	DISTRIB.	DIVISÃO	Ci	Uj	U ²
UA	Repetitividade	0,141	normal	1	1	0,06325	0,00400
UB	Incerteza herdada padrão	0,12	retangular	√3	1	0,06928	0,00480
UB	Resolução do padrão	0,01	triangular	√6	1	0,00408	0,00002
UB	Resolução da máquina	1,000	retangular	√3	1	0,57735	0,33333
UB	Resolução do penetrador	0,50	triangular	√6	1	0,20412	0,04167

U3 0,3838167 K 1,96

INCERTEZA PADRONIZADA COMBINADA **INCERTEZA EXPANDIDA**
 $U_c = \sqrt{U_3^2}$ 0,61953 $U = K \cdot U_c$: 1,21 HR 15N

4. MEDIÇÃO COM BLOCOS PADRÃO DUREZA

Ensaio (Hr)	HP	Leituras						Valor encontrado		Erro max. Permissível por Norma	
		Hm (Hr)	Erp (Hr)	Ee (Hr)	Erp ± (Hr)	Ee ± (Hr)					
HR 15T	90,98	91,0	91,0	90,6	90,8	90,6	90,80	0,40	-0,18	1,20	3,00
HR 15T	82,95	83,2	83,6	83,4	83,6	83,2	83,40	0,40	0,45	1,20	3,00
HR 15T	76,57	77,2	77,4	77,2	77,6	77,4	77,36	0,40	0,79	1,20	3,00

SÍMBOLO	FONTE DE INCERTEZA	VALOR - XL	DISTRIB.	DIVISÃO	Ci	Uj	U ²
UA	Repetitividade	0,190	normal	1	1	0,08485	0,00720
UB	Incerteza herdada padrão	0,31	retangular	√3	1	0,17898	0,03203
UB	Resolução do padrão	0,01	triangular	√6	1	0,00408	0,00002
UB	Resolução da máquina	1,000	retangular	√3	1	0,57735	0,33333
UB	Resolução do penetrador	0,50	triangular	√6	1	0,20412	0,04167

U3 0,4142500 K 1,96

INCERTEZA PADRONIZADA COMBINADA **INCERTEZA EXPANDIDA**
 $U_c = \sqrt{U_3^2}$ 0,64362 $U = K \cdot U_c$: 1,26 HR 15T



Este Certificado é intransferível. A sua reprodução só deve ser feita integralmente, sem nenhuma alteração e com objetivos que legalmente se justifiquem. Os resultados aqui contidos se reportam às condições de ensaios nele descritas e de acordo com a Norma de Referência citada.

Anexo II: Programa CNC torno

Programa 003: (PÇ_TEMPERADA_LIMA)

N10G21G40G90G95	G92S2000M3
G0X150Z5	G0X50.5
T0606(AP1=1.5 V _c 80)	G1X48.25F.25
G96S80	Z-70
G92S2000M3	G0X150
G00X60Z3(F0.35)	T0707
G1X48Z1.F.3	M00
G1Z-14.F.35	T0606(F0.15)
G0X150	G96S80
T0707	G92S2000M3
M00	G0X50.5
T0606(F0.25)	G1X48.25F.15
G96S80	Z-84
G92S2000M3	G0X150
G0X50.5	T0707
G1X48F.25	M00(AP3=1.5 V _c 80)
G1Z-28F.25	T0606(F0.35)
G0X150	G96S80
T0707	G92S2000M3
M00	G0X50.5
T0606(F0.15)	G1X48.5F.35; Z-98
G96S82	G0X150
G92S2000M3	T0707
G0X50.5	M00(F0.25)
G1X48F.15	T0606
Z-42	G96S80
G0X150	G92S2000M3
T0707	G0X50.5
M00(AP2=1.0 V _c 80)	G1X48.5F.25; Z-112
T0606(F0.35)	G0X150
G96S82	T0707
G92S2000M3	M00(F0.15)
G0X50.5	T0606
G1X48.25F.35	G96S80
Z-56	G92S2000M3
G0X150	G0X50.5
T0707	G1X48.5F.15; Z-126
M00	G0X150
T0606(F0.25)	M30
G96S80	

11. APÊNDICES

Apêndice I - Resultado de Análise de Microdureza

