

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

**ESTUDO DOS MACRO E MICRO DETERMINANTES DE
QUALIDADE (MMDQ) DE PEÇAS EM PROCESSO DE FURAÇÃO
OTIMIZADO**

ANDRÉ DE LIMA

ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR

CO ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2002

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

**ESTUDO DOS MACRO E MICRO DETERMINANTES DE
QUALIDADE (MMDQ) DE PEÇAS EM PROCESSO DE FURAÇÃO
OTIMIZADO**

ANDRÉ DE LIMA

ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR

CO ORIENTADOR: PROF. DR. NIVALDO LEMOS COPPINI

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2002

**ESTUDO DOS MACRO E MICRO DETERMINANTES DE
QUALIDADE (MMDQ) DE PEÇAS EM PROCESSO DE FURAÇÃO
OTIMIZADO**

ANDRÉ DE LIMA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, em 26 de julho de 2002, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Milton Vieira Junior

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Prof. Dr. Nivaldo Lemos Coppini, Presidente

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Prof. Dr. Álvaro José Abackerli

Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP

Prof. Dr. Álisson Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

A

Deus, aos meus pais e para todas as pessoas
que eu amo.

AGRADECIMENTOS

À minha família e aos amigos, para essas pessoas que se fizeram presentes no auxílio desta conquista

Ao professor Milton Vieira Júnior pela orientação, compreensão e incentivo dispensado ao desenvolvimento deste trabalho, além da sua amizade.

Ao professor Nivaldo Lemos Coppini, pela coorientação do trabalho, incentivo e amizade.

Ao Prof. Gilberto W. Arenas Miranda, pela colaboração e disposição em discutir os resultados obtidos.

À Secretaria da Pós-Graduação da FEMP, pelo apoio, e principalmente, pela amizade demonstrada pelas secretária e bolsistas, Marta, Flávia e Daniele.

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

À IATON, e aos funcionários que colaboraram direta ou indiretamente nas análises realizadas.

À LABMAT - e seus proprietários e funcionários, pelo auxílio na realização das análises

À UNICAMP, pela disponibilização dos laboratórios e infraestruturas.

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

À CAPES – pelo apoio financeiro.

"A Humanidade é Desumana / Mas Ainda Temos Chance"

Quando o Sol Bater na Janela do Teu Quarto

Renato Russo

1989

MÚSICO E POETA BRASILEIRO

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. PROCESSO DE FURAÇÃO.....	5
2.2. EVOLUÇÃO DO PROCESSO.....	9
2.3. FERRAMENTAS DE FURAÇÃO.....	10
2.4. ELIMINAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NA FURAÇÃO.....	16
2.5. ELIMINAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE E FERRAMENTAS PARA FURAÇÃO.....	20
3. MACRO E MICRO DETERMINANTES DA QUALIDADE (MMDQ)	22
3.1. DESVIOS DIMENSIONAIS E DE LOCALIZAÇÃO.....	24
3.1.1. DESVIOS DE DIMENSÃO - DIÂMETRO.....	25
3.1.2. DESVIOS DE PERPENDICULARISMO.....	26
3.1.3. DESVIO DE LOCALIZAÇÃO.....	27
3.2. INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	29
3.2.1. CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC).....	30
3.2.2. MICRODUREZA.....	32
3.2.3. TENSÕES RESIDUAIS.....	35
4. PROPOSTA DO TRABALHO	37
5. MATERIAIS E MÉTODOS	39
5.1. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO.....	39
5.2. ANÁLISE DOS MMDQ.....	42
5.2.1. ANÁLISE DIMENSIONAL E DE LOCALIZAÇÃO.....	42
5.2.2. ANÁLISE DA CAC.....	45
5.2.3. ANÁLISE DA TENSÃO RESIDUAL.....	52
5.2.4. MICRODUREZA.....	54
5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	57
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
6.1. DESVIOS DE FORMA E DIMENSIONAIS.....	59
6.2. MICRODUREZA.....	68
6.3. ANÁLISE DE FORMAÇÃO DA CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC).....	73
6.4. ANÁLISE DE TENSÕES.....	84
6.5. RELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DAS ANÁLISES.....	88

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	92
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	100
ANEXOS.....	103
ANEXO I	104
ANEXO II.	108
ANEXO III	111
ANEXO V.....	116
ANEXO VI.....	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAC/ HAZ	Camada Afetada pelo Calor / Heat Affect Zone.
CNC	Comando Numérico Computadorizado.
Dry Cutting	Usinagem sem Fluido de Corte.
HSC	High Speed Cutting
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas.
MmdQ	Macro e micro determinantes de Qualidade.
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificação.
Vc	Velocidade de Corte.
ϕ	Diâmetro.
MFDP	máquina - ferramenta - peça - dispositivo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Operações de Usinagem Que Envolvem Fabricação de Cabeçote de Motores Automotivos	7
Figura 2 - Partes de Broca Helicoidal Com Haste Cilíndrica E Com Haste Cônica.....	10
Figura 3 - Exemplo da Variação da Velocidade de Corte ao Longo da Direção Radial das Arestas de Corte ($\phi=10\text{mm}$ e $n=5188\text{ rpm}$).....	12
Figura 4 - Principais Problemas Encontrados na Furação a Seco.....	13
Figura 5 - Faixas de Velocidade de Corte para Usinagem HSC em Furação e em Rosqueamento com Machos.....	14
Figura 6- Exemplo de uma Furadeira com Cabeçote Polimandrill.....	15
Figura 7- Alternativas Modernas em Brocas de Metal Duro.....	16
Figura 8 - O Impacto dos Líquidos Refrigerantes nos Custos Totais de Usinagem.....	17
Figura 9 - Esquematização dos Efeitos Térmicos e Mecânicos em Peças Usinadas.....	23
Figura 10 – Exemplo de desvio de perpendicularismo para furos.....	27
Figura 11- Exemplo de tolerância de localização de ponto.....	28
Figura 12 – Exemplos de tolerância de localização	29
Figura 13 – Penetrador e Impressão Vickers.....	34
Figura 14 - Imagens da Furação do Corpo de Prova.....	37
Figura 15 - Corpo de Prova CP1 420X310X32 mm	40

Figura 16 - Corpo de Prova CP2 41X41X32 mm (MIRANDA et al, 2001).....	40
Figura 17 - Verificação da Excentricidade.....	41
Figura 18 - Exemplo de Posicionamento do CP.....	43
Figura 19 - Exemplo de Medições para Colunas Concluídas	44
Figura 20 – Imagem da Micro-escala com destaque para o detalhe E (espelho).	46
Figura 21 – a) Imagem da calibração parcial, posição horizontal.(eixo X);b) Imagem da calibração total, posição vertical (eixo Y), com a sobreposição dos valores do eixo X.....	48
Figura 22– Imagens das janelas de medida da ferramenta de calibração, e em detalhe o ponto inicial e o ponto final.....	49
Figura 23 – Demonstração dos arquivos de calibração gerados para atender as ampliações do microscópio utilizado.....	49
Figura 24 – Imagem de um processo de medição	52
Figura 25 - Localizações das Medições de Tensões Superficiais.....	54
Figura 26 – Micro-duromêtro utilizado.....	55
Figura 27 – Valores de diâmetro obtidos na medição	60
Figura 28 - Comportamento do diâmetro dos furos ao longo da vida da broca em Relação ao Valor Nominal.....	60
Figura 29 - Variação absoluta do diâmetro dos furos em relação ao valor nominal medida ao longo da vida da broca.....	61
Figura 30 – Variação do perpendicularismo dos furos ao longo da vida da broca.....	63

Figura 31 – Variação absoluta do perpendicularismo dos furos ao longo da vida da broca.....	64
Figura 32 - Figuras das arestas principais de corte medidas.....	65
Figura 33 – Variação de localização dos furo nos eixos X e Y.....	66
Figura 34 – Variação de deslocamento dos eixos X e Y.....	67
Figura 35 – Disposição das impressões de microdureza A) amostra 416 B) amostra 160	69
Figura 36 – Comportamento da microdureza em relação ao fim de vida da broca.....	70
Figura 37 – Análise de microdureza da amostra 16.....	71
Figura 38 – Análise de microdureza da amostra 480.....	72
Figura 39 – Posições de estabilização da Microdureza	73
Figura 40 – Amostra de microestrutura não afetada.....	74
Figura 41 – Amostra de microestrutura afetada.....	75
Figura 42 – Comportamento da CAC ao longo do ensaio.....	77
Figura 43 – CAC do furo 16	78
Figura 44 – CAC do furo 144	79
Figura 45 – CAC do furo 272	79
Figura 46 – CAC do furo 336	80
Figura 47 – CAC do furo 464	80
Figura 48 – CAC do furo 496	81
Figura 49 – Análise de imagem X Análise de microdureza.....	82

Figura 50 – Análise de Imagem X Análise de microdureza do conjunto	83
Figura 51 – Composição de análises	84
Figura 52 – Correlação entre os dados de tensão	85
Figura 53 – Distribuição do tipo de tensão na posição B	86
Figura 54 - Distribuição dos tipos de tensão na Posição C.....	87
Figura 55 – Comparação do comportamento das CAC e do diâmetro.....	88
Figura 56 – Comparação do comportamento da microdureza e das tensões..	89
Figura 57 – Comparação do comportamento das tensões e CACs	90
Figura 58 – Comparação do comportamento do Diâmetro e do Perpendicularismo	91
Figura 59 – Análise de microdureza furo 16.....	117
Figura 60 - Análise de microdureza furo 32.....	117
Figura 61- Análise de microdureza furo 80.....	118
Figura 62 - Análise de microdureza furo 96.....	118
Figura 63 - Análise de microdureza furo 144.....	119
Figura 64 - Análise de microdureza furo 160.....	119
Figura 65 - Análise de microdureza furo 224.....	120
Figura 66 - Análise de microdureza furo 272.....	120
Figura 67 - Análise de microdureza furo 288.....	121
Figura 68 - Análise de microdureza furo 352.....	121
Figura 69 - Análise de microdureza furo 400.....	122

Figura 70 - Análise de microdureza furo 416.....	122
Figura 71 - Análise de microdureza furo 464.....	123
Figura 72 - Análise de microdureza furo 480.....	123
Figura 73 - Furos 16 e 32 respectivamente.....	125
Figura 74 - Furos 48 e 64 respectivamente.....	125
Figura 75 - Furos 80 e 96 respectivamente.....	125
Figura 76 - Furos 112 e 128, respectivamente.....	126
Figura 77 - Furos 144 e 160, respectivamente.....	126
Figura 78 - Anexo VI: Furos 176 e 192, respectivamente.....	126
Figura 79 - Furos 208 e 224, respectivamente.....	127
Figura 80 - Furos 240 e 256, respectivamente.....	127
Figura 81 - Furos 272 e 288, respectivamente.....	127
Figura 82 - Furos 304 e 320, respectivamente.....	128
Figura 83 - Furos 352 e 368, respectivamente.....	128
Figura 84 - Furos 384 e 400, respectivamente.....	128
Figura 85 - Furos 416 e 432, respectivamente.....	129
Figura 86 - Furos 448 e 464, respectivamente.....	129
Figura 87 - Furo 480.....	129

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS OBTIDOS COM AS ALTERAÇÕES DE PARÂMETROS DE CORTE NUM PROCESSO DE FURAÇÃO.....	7
TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DOS ELEMENTOS ENCONTRADOS NA ANÁLISE QUÍMICA DA BROCA NOVA (%INICIAL) E AO FINAL DA VIDA (%FINAL)	62
TABELA 3 – TABELA DOS VALORES DAS MEDIÇÕES DA CAC	76

LIMA, André. **ESTUDO DOS MACRO E MICRO DETERMINANTES DE QUALIDADE DE PEÇAS EM PROCESSO DE FURAÇÃO OTIMIZADO**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo fazer uma avaliação de aspectos macro e micro determinantes de qualidade – MmdQ, (integridade da camada superficial e subsuperficial, erros de forma e dimensionais) em peças de aço ABNT 4340, obtidas a partir do processo de furação realizado sob condições otimizadas de processo ($V_{m\text{xp}}= 163$ m/min; $f=0,18$ mm/rev), sem refrigeração (“dry cutting”) e com broca maciça (10mm de diâmetro e furando até uma profundidade de 32mm). Procura-se ainda analisar as influências que esses MmdQ podem ter sobre a ocorrência de possíveis falhas na utilização das peças.

PALAVRAS-CHAVE: Macro e micro determinantes de qualidade, integridade superficial, Usinagem sem fluido de corte, otimização, CAC.

LIMA, André. **ESTUDO DOS MACRO E MICRO DETERMINANTES DE QUALIDADE DE PEÇAS EM PROCESSO DE FURAÇÃO OTIMIZADO**, “*Study Of Macro And Micro Quality Determinants Of Pieces Obtained From Optimized Drilling Process*”. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste.

ABSTRACT

The present research aims an evaluation of macro and micro quality determinants - MmdQ (such as integrity of the inner surface and dimensional and form deviation) of parts made of ABNT4340 steel, obtained from optimized drilling process ($V_{m\text{xp}} = 163 \text{ mm/min}$; $f = 0,18 \text{ mm/rev}$), dry cutting and using a drill with 10 mm diameter, cutting to a depth of 32 mm. It also aims to analyze which influences these determinants (MmdQ) can have over the failure occurrence on the parts.

KEYWORDS: Optimized drilling process; Dry Cutting; Surface integrity, HAZ

1. INTRODUÇÃO

Com a intensa cobrança por agilidade produtiva resultante, principalmente, do processo de globalização vivido a partir da década de 90, os centros de pesquisa, as indústrias e os demais segmentos relacionados ao desenvolvimento de atividades produtivas vêm sofrendo forte pressão no sentido de tomar atitudes drásticas referentes aos tempos empregados na etapa de fabricação de produtos.

Desde meados da década de 70, a evolução da usinagem nas áreas de torneamento e fresamento foi notável, havendo muitas pesquisas realizadas sobre estes temas. A combinação de modernas ferramentas modulares com novas geometrias de arestas de corte, com materiais mais resistentes ao desgaste e novas coberturas, tornou possível a elevação das velocidades de corte a níveis inimagináveis até o início da década de 80. De outro lado, as máquinas-ferramentas de tecnologia mais recente, que podem trabalhar a altíssimas velocidades de corte e deslocamento dos eixos, permitem que os ciclos de usinagem sejam encurtados cada vez mais (KALHOFER, 1997).

A competitividade vem impulsionando as empresas a estudar as diversas possibilidades de redução de custos, em especial nos de setores diretamente ligados à produção, investindo em inovações tecnológicas dos processos de usinagem (altíssima velocidade de corte - HSC) e na obtenção de novos materiais (ferramenta e produto), (MULLER, 2000).

Junto a estas inovações, as exigências econômicas e ambientais têm sugerido a utilização de processos de usinagem sem fluido de corte (Dry cutting) ou com mínima quantidade de lubri-refrigeração de corte (MQL), atomizado por ar comprimido, na substituição do fluido de corte emulsionado (BRAGA, 2001).

Pelo lado operacional, houve grande enfoque no aumento da ordem de grandeza dos parâmetros de usinagem. No entanto nem sempre esses aumentos foram acompanhados de perto por especialistas da área; na maioria

das vezes partiram de decisões empíricas, normalmente tomadas por profissionais, sem o devido conhecimento das solicitações às quais as peças produzidas serão submetidas no campo (MULLER, 2000).

Entretanto, houve uma área da usinagem que não acompanhou tal avanço: a das ferramentas rotativas sólidas, principalmente brocas e machos, cujo atraso já sinalizava (CRUZ, 1978); tal atraso tem sido tirado apenas nos últimos anos com o desenvolvimento de novas tecnologias específicas (MULLER, 2000).

Dentre os processos de usinagem que passaram por esse tipo de investigação, destaca-se o processo de furação, cenário da presente pesquisa, que vem passando por grandes transformações que visam a melhoria e a otimização do processo. Essas transformações são resultados de pesquisas que buscam equilibrar o conhecimento e o avanço tecnológico acerca do processo de furação em relação aos demais processos convencionais de usinagem com aresta de corte de geometria definida. (BRAGA et al, 2001; MULLER, 2000).

Tendo em vista a importância da furação nos processos de fabricação, inúmeras pesquisas visando melhorias de processo, geralmente através de novos materiais e tecnologias de fabricação de brocas, eliminação de fluidos de corte ou otimização de condições de usinagem (SALES et al, 1998). Mas pouco se atêm aos macro e micro determinantes de qualidade (MmdQ¹) dos produtos usinados, interessando-se mais em resultados otimizados (vida, tempo, etc.). O trabalho de MIRANDA (2000) é um claro exemplo desse tipo de abordagem, pois procurou "explorar os limites de utilização de brocas inteiriças de metal duro, visando analisar as condições econômicas e de produtividade destas condições limites", não havendo preocupação com os resultados em termos dos MmdQ.

Tal cenário provocou o interesse de alguns grupos de pesquisa em estudar com maior atenção as relações existentes entre as melhorias introduzidas em busca da otimização do processo de furação (aumentos de velocidades de

¹ O termo MmdQ é proposto neste trabalho como abreviação do conjunto dos determinantes da qualidade de interesse.

cut, elimination of lubrication), with the MmdQ. VIEIRA et al, 1998, already pointed out that shape and/or dimensional deviations and that the integrity of the subsurface layer can suffer significant changes due to the use of optimized conditions in limit situations.

In this context, the present work intends to analyze, from the results obtained in a drilling process without fluid and with optimized cutting parameters, the behavior of the MmdQ as a function of this condition of machining. It also intends to start a discussion about the occurrence of possible failures that arise in the use of parts and that can have their origin from the change of these determinants due to thermal and mechanical solicitations from the use of tools in extreme conditions.

The main objective of this work is to use the concepts of MmdQ to evaluate the viability of the optimization strategy of the cutting parameters in a drilling operation without fluid. As parameters of this analysis, some of the MmdQ measured in test pieces obtained in tests previously carried out under optimization of the process and tool use up to its life limit will be used.

1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO

For this work, the structure is as follows:

Cap. 2 - Review of Literature: this chapter brings a synthesis of the drilling process, from its origin to the technological changes that have been introduced. These changes are treated as evolution, not only of the process, but of the entire scenario that it involves (tools, conditions of machining, etc.);

Cap. 3 - Macro and Micro Determinants of the Quality of Drilled Parts (MmdQ): in this chapter, the MmdQ is defined from a bibliographic review of these determinants; it also defines which

são os MmdQ de interesse para o trabalho e as conseqüências que eles podem acarretar à qualidade das peças furadas;

Cap. 4 - Proposta de Trabalho: neste capítulo procura-se, de maneira sucinta e objetiva, esclarecer quais são os pontos almejados por este trabalho.

Cap 5 - Materiais e Métodos: neste capítulo define-se os equipamentos e os materiais necessários para o desenvolvimento do trabalho, bem como os métodos de medição e análise de resultados utilizados;

Cap 6 - Parte Experimental: neste capítulo descreve-se as etapas de obtenção dos corpos de prova e dos resultados de MmdQ necessários para a análise proposta;

Cap 7 - Resultados e Discussão: neste capítulo, expõe-se os resultados das análises desenvolvidas sobre o comportamento dos MmdQ de interesse;

Cap 8 - Conclusões e Propostas de Trabalhos Futuros.

Ao final do trabalho estão listadas as bibliografias citadas, a consultada e os Anexos considerados importantes para a compreensão do trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta um conjunto de conceitos sobre o processo de furação que são necessários para a compreensão da proposta. Traz noções sobre otimização da usinagem e sobre metodologias de otimização do processo, além de apresentar uma breve localização das principais mudanças tecnológicas que vêm sendo introduzidas no processo de furação, e da evolução de todo cenário envolvido.

2.1. PROCESSO DE FURAÇÃO

A história das máquinas de furar (furadeiras), seguramente, é uma das mais longas e antigas dentre as das máquinas-ferramenta. Trata-se de uma história que vem sendo marcada por uma visível suplantação desses equipamentos diante das dinâmicas solicitações advindas do mundo industrial (DINIZ et al, 1999; CRUZ, 1978).

Ao longo desta história foram muitas mudanças pelas quais passaram as furadeiras, numa tentativa de, pelo menos, suprir em parte as necessidades momentâneas do mercado. Essa trajetória de mudanças foi marcada pelo aparecimento de furadeiras cada vez mais robustas e tecnologicamente arrojadas. Porém, mesmo com tais inovações, as furadeiras tendem a ser substituídas em diversas operações por centros de usinagens, em função das suas limitações mecânicas e da falta de flexibilidade, entre outros aspectos.

Ao contrário do que vem ocorrendo com as furadeiras, o processo de furação, vive atualmente uma realidade totalmente diferente: tem-se uma concentração de estudos voltados em prol de uma exigência mercadológica que almeja incessantemente uma redução dos custos seguido de um aumento de produtividade (DINIZ et al, 1999).

O processo de furação é um dos mais utilizados na indústria manufatureira em geral, e largamente explorado nas indústrias do setor automobilístico. Isso pode ser facilmente observado tomando-se por base que a maior parte das peças de qualquer tipo de indústria possui pelo menos um “furo”, e que somente uma parte muito pequena dessas peças já vem com o furo pronto ou quase pronto do processo de obtenção da peça bruta (DINIZ ET AL, 1999). É o caso das peças sinterizadas que têm parte de seus furos necessitando apenas de calibração dimensional e de forma (VIEIRA et al, 1998). Em geral as peças têm que ser furadas em cheio ou ter seus furos aumentados através do processo de alargamento, o que torna o estudo visando à otimização desse processo muito importante.

Para explicar a participação das operações de furação na indústria metal-mecânica, toma-se por base o levantamento feito por CARDOSO(2000) em uma grande indústria fornecedora de autopeças. Para a fabricação de um cabeçote de motor diesel 8 cilindros, 53% das operações realizadas são de furação (Figura1). Outros exemplos podem ser tomados, mas não é escopo do presente trabalho identificar o volume das operações de furação na indústria. Deseja-se aqui apenas mostrar que estas operações podem ser de volume significativo, justificando a atenção que lhe vem sendo dada.

A Tabela1 demonstra o resultado obtido com rigorosos controles do processo de furação, ainda dentro da análise desenvolvida por CARDOSO, 2000. É possível observar que aumentos nos parâmetros de usinagem (velocidade de corte e avanço) podem efetivamente otimizar o processo e reduzir os custos da operação (vida da ferramenta aumenta em até 1500% e o custo da operação pode ser reduzido em mais de 90%).

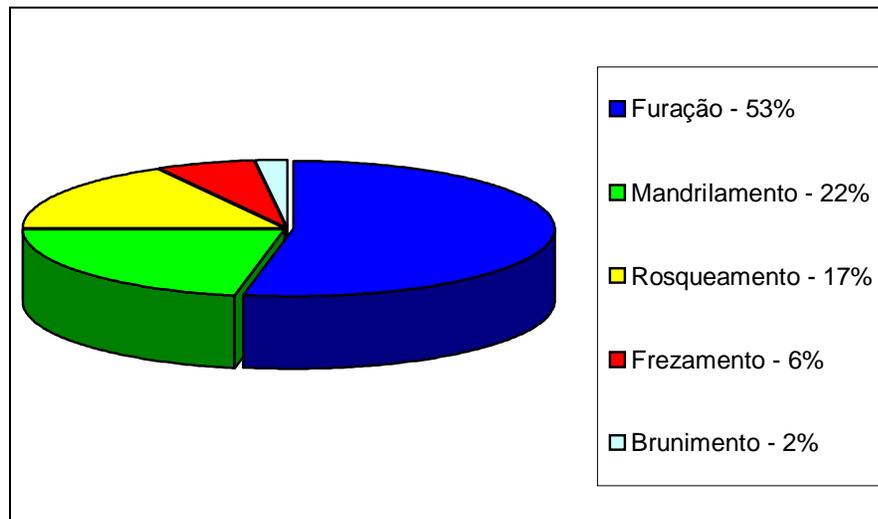


FIGURA 1 - OPERAÇÕES DE USINAGEM QUE ENVOLVEM FABRICAÇÃO DE CABEÇOTE DE MOTORES AUTOMOTIVOS

FONTE:(CARDOSO, 2000)

TABELA 1 - RESULTADOS OBTIDOS COM AS ALTERAÇÕES DE PARÂMETROS DE CORTE NUM PROCESSO DE FURAÇÃO

Parâmetros	Antes	Depois	Ganho %
Velocidade de Corte	80 m/min	100 m/min	20%
Avanço	234 mm/min	732 mm/min	213%
		500 mm/min	114%
Tempo de Operação	0.6 min.	0.25 min.	58.3 %
Vida	30 pç	500 pç.	1567 %
		180 pç	500%
Custo da Operação	R\$ 3.70 / pç	R\$0.21 / pç	94%

FONTE: (CARDOSO, 2000).

No processo de furação, os parâmetros de corte, na maioria das vezes, são limitados pela velocidade máxima dos fusos das máquinas-ferramentas, pelos seus deslocamentos e pela rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo-

peça. O processo de furação encontra-se defasado em relação aos outros processos de usinagem por outras diversas razões. A principal delas é o diâmetro dos furos. Uma broca de 10 mm de diâmetro para ser utilizada com velocidades compatíveis ao metal duro (V_c em torno de 200 m/min), precisaria de uma rotação da ordem de 6400 rpm, algo muito além dos limites das furadeiras convencionais. Por este motivo, cresceu o número de utilizações de centros de usinagem CNC para processo de furação (DINIZ ET AL, 1999).

Outro motivo para tal defasagem já era apontado por CRUZ (1978): “as brocas helicoidais não tiveram o mesmo nível de desenvolvimento das demais ferramentas de usinagem, seja no que se refere à geometria das ferramentas ou aos materiais utilizados”.

Tendo em vista a importância da furação nos processos de usinagem, novos materiais e processos para a fabricação de peças e de brocas surgiram, produzindo ferramentas com ampla gama de dureza e tenacidade (SALES, 1998). Porém as brocas mais utilizadas ainda continuam sendo as brocas de aço rápido. Isso se dá em parte pela falta de informação das pessoas que estão envolvidas com as tomadas de decisões dentro das empresas.

Essa é uma das principais razões das quebras de ferramentas observadas nos casos em que a indústria procura aplicar novas tecnologias de usinagem (HSC, furação sem fluido de corte, etc.) a fim de otimizar o processo. Como a incidência de quebras é um dos principais motivos identificados por CARDOSO (2000) para a ocorrência de falhas e paradas no processo produtivo, as inovações acabam por ser descartadas e o processo permanece inalterado, mantendo a condição de atraso tecnológico.

Por outro lado, existem grupos de pesquisas desenvolvendo trabalhos com o propósito de superar limites dentro do conjunto ferramenta/máquina/peça. Com frequência encontram novos recursos para romper as barreiras da otimização dos processos. No caso da furação, passou-se ao desenvolvimento de novas ferramentas, com superfícies, arestas e ângulos de corte bastante complexos,

buscando extrair algo mais das operações do que redução de tempo e de custo de produção (SOTO, 2000), o que será discutido mais adiante.

2.2. EVOLUÇÃO DO PROCESSO

As ferramentas de furar são encontradas entre os utensílios mais antigos empregados pelo homem. As máquinas ferramentas de furar surgiram a partir do ano de 1770, quando eram empregadas as púas na furação de madeira. Já nesta época a forma geométrica das púas se assemelhava muito com as formas das brocas helicoidais utilizadas até então. A partir de 1822 a púa passa então a ser aplicada também na furação dos metais (FERRARESI, 1977).

No entanto com o grande salto dado pela industrialização em meados do século XIX, passou-se a reclamar por uma ferramenta de furar mais eficiente, que permitisse velocidades de trabalho maiores. Despertou então, nos setores envolvidos, um desejo de quantificar, ou melhor, comparar de forma quantitativa uma operação com outra, tendo assim condições de argumentar e propor melhorias, o que possivelmente deu origem ao conceito de usinabilidade (WADA, 1997).

A usinabilidade de um metal pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro como padrão. Essas propriedades compreendem grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem dos metais, que podem ser elencadas como vida da ferramenta, esforços de corte, produtividade e características do cavaco (WEINGAERTNER e SCHROETER, 1991; FERRARESI, 1977). A este elenco, pode-se acrescentar os determinantes de qualidade dos produtos, fatores que ganharam importância ao final do século XX (VIEIRA et al, 1998).

Desde meados da década de 1990, o desenvolvimento de ferramentas tem avançado tão rapidamente que os problemas de tensão térmica, que ocorrem

em furação sem refrigeração, podem ser superados. Novas geometrias permitem a remoção dos cavacos quentes do furo sem esquentar a ferramenta. Máquinas-ferramentas estão sendo desenvolvidas para que suas reações sejam quase inertes à temperatura, permitindo a remoção dos cavacos sem o uso de fluidos de corte (KAMMERMEIER, 2001).

2.3. FERRAMENTAS DE FURAÇÃO

As ferramentas discutidas neste capítulo são, de uma maneira geral, as brocas, principalmente as helicoidais, por serem estas as ferramentas de objeto de estudo do presente trabalho.

Para melhor entender esta ferramenta, são demonstradas na Figura 2 algumas formas básicas de construção, concepção e algumas partes que compõem uma broca helicoidal, segundo DINIZ, et al (1999):

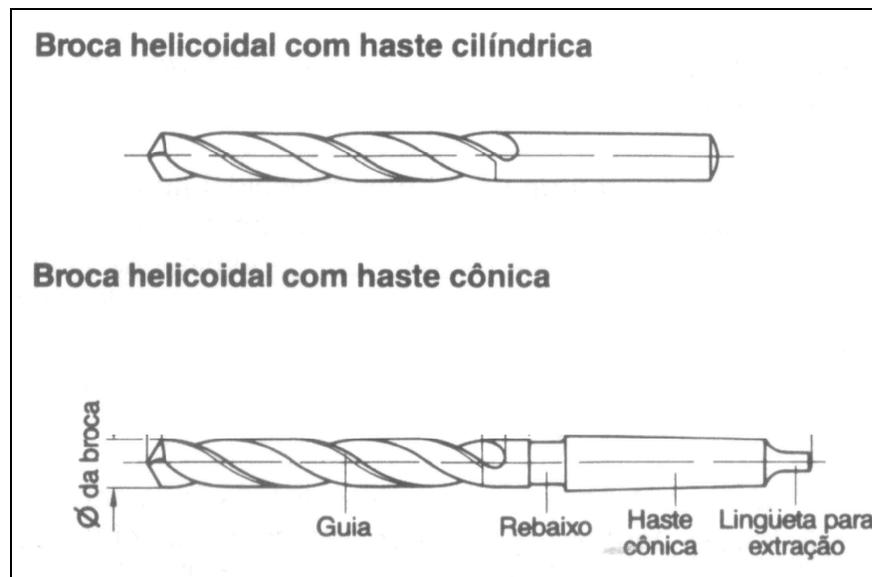


FIGURA 2 - PARTES DE BROCA HELICOIDAL COM HASTE CILÍNDRICA E COM HASTE CÔNICA

FONTE: (DINIZ ET AL, 1999).

- ✓ Haste – destina-se à fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15mm) em geral usa-se brocas de haste cilíndricas e a fixação nas máquinas se dá por intermédio de mandris. Em brocas de maiores diâmetros prefere-se as hastes cônicas que são presas às máquinas por intermédio de um cone Morse, o que possibilita melhor fixação;
- ✓ Guias - são as superfícies externas de uma broca que se apresentam como duas regiões (uma em cada aresta secundária de corte) que tem diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Elas têm duas funções básicas – a primeira, como o próprio nome diz, é a de guiar a broca dentro do furo; a segunda é de evitar que toda a parede externa da broca atrite com as paredes do furo, diminuindo assim o esforço necessário para a furação;
- ✓ Canais helicoidais – são as superfícies de saídas da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais pode ser de 28° para brocas de aplicação geral (brocas do tipo N), 15° para brocas destinadas a usinagem de materiais com cavacos curtos (brocas tipo H) e 40° para brocas destinadas a usinagem de materiais com cavaco longos e/ou materiais moles (brocas tipo W). O comprimento do canal helicoidal também pode variar dependendo do diâmetro da broca e da profundidade do furo que se deseja usinar;
- ✓ Diâmetro (\varnothing) – é medido entre as duas guias da broca, o diâmetro da broca normalmente tem tolerância h8, ele é de fundamental importância para o processo, pois é ele quem confere à peça usinada as características dimensionais desejadas em projeto;
- ✓ Núcleo – parte interior da broca de diâmetro aproximado de 0,16 \varnothing . Este garante rigidez a broca;

- ✓ Arestas de corte – numa broca helicoidal as duas arestas principais de corte não se encontram em um ponto, mais existe uma terceira aresta ligando-as. Esta terceira aresta é achada de aresta transversal de corte. O ângulo formado pelas arestas principais de corte é chamado de ângulo de ponta (DINIZ et al, 1999).

Na maioria das ferramentas de usinagem, as cargas mecânicas e térmicas sobre a aresta de corte são bastante significativas, principalmente no processo de furação em que a velocidade de corte varia ao longo da direção radial (Figura 3), permitindo a geração de aresta postiça de corte o que dificulta a remoção do cavaco. Com isso, retira-se menos o calor gerado pelas altas velocidades de corte, com conseqüente aumento da temperatura no gume da broca, podendo vir a comprometer a vida da broca (BRAGA et al, 2001).

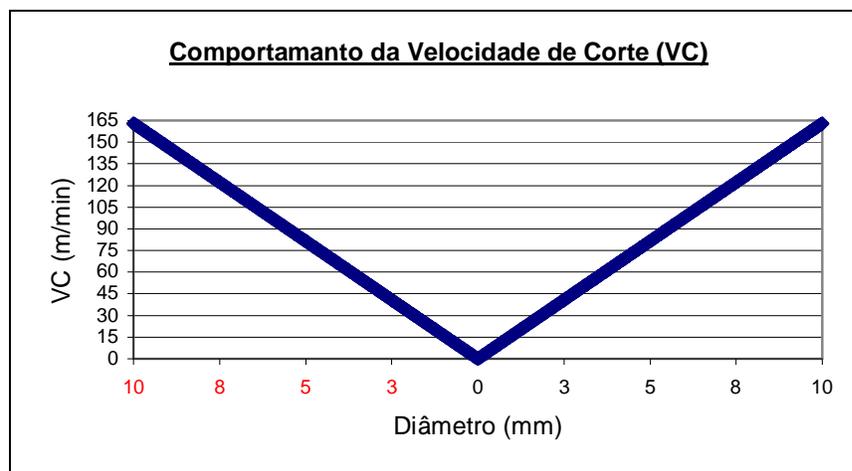


FIGURA 3 - EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE CORTE AO LONGO DA DIREÇÃO RADIAL DAS ARESTAS DE CORTE ($\phi=10\text{MM}$ E $N=5188\text{ RPM}$).

Na Figura 4 tenta-se, de maneira resumida, mostrar alguns dos principais problemas encontrados na furação sem fluido de corte, que vêm sendo resolvidos ao longo do tempo, como resultado das inovações científica e tecnológicas das áreas de desenvolvimento das brocas (MULLER, apud BRAGA, 2001).

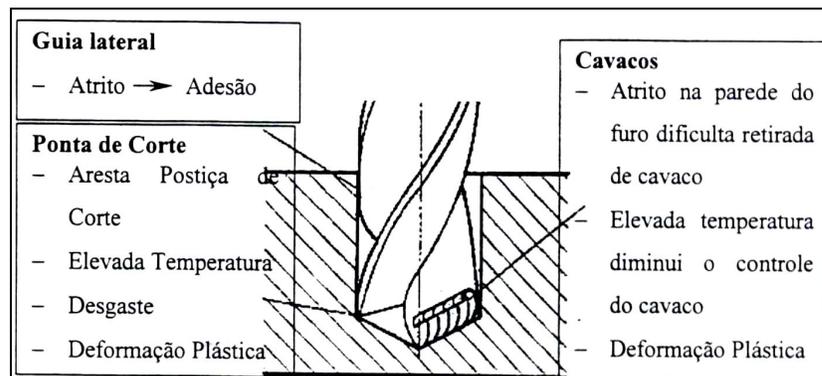


FIGURA 4 - PRINCIPAIS PROBLEMAS ENCONTRADOS NA FURAÇÃO A SECO

FONTE: (MULLER, APUD BRAGA 2001).

Com relação ao atrito entre ferramenta e cavaco, que provoca a adesão de material e a conseqüente formação da aresta postiça, as brocas vêm recebendo revestimentos como TiN-Al. Com relação ao atrito entre o cavaco e a parede do furo, brocas com perfis especiais vêm sendo desenvolvidas.

Na produção de um furo devem ser considerados todos os requisitos: diâmetros, profundidades, tolerâncias, produção e as ferramentas de que se dispõe para tal fim. Uma regra fundamental é que as brocas helicoidais sempre trabalham, sob a mesma condição: a velocidade de corte varia de zero, no centro da broca, até o valor máximo na periferia da ferramenta (extremidade das arestas principais de corte) (YUHARA, 1982) como mostra a FIGURA 3.

Dando maior ênfase à complexidade do processo de furação, na FIGURA 5, são apresentadas as faixas de velocidade de corte de processos de usinagem de furação e rosqueamento com machos (ferramentas rotativas), para trabalhar com a tecnologia de usinagem HSC, (MULLER, 2000; SOTO, 2000). No caso da furação a faixa de velocidade de corte indica que, numa comparação com os dados da FIGURA 3, em uma mesma operação de usinagem as arestas principais de corte desenvolvem trabalhos em faixas de velocidades de corte desde as tidas como convencionais até velocidades típicas de HSC. Esse é um

tipo de comportamento que não ocorre em outros tipos de processos de usinagem (torneamento, fresamento, por exemplo).



FIGURA 5 - FAIXAS DE VELOCIDADE DE CORTE PARA USINAGEM HSC EM FURAÇÃO E EM ROSQUEAMENTO COM MACHOS

FONTE: (MULLER, 2000).

Dentro das evoluções sofridas pelo processo de furação, pode-se destacar alguns conceitos como desenvolvimento de máquinas-ferramenta com mais de um eixo e novos conceitos de ferramental. Um exemplo claro disso, são as máquinas-ferramenta que realizam o processo de furação múltipla, ou melhor, máquinas com vários mandris (polimandril). Nesse caso tenta-se suprir o tempo gasto com as baixas velocidades de corte, executando simultaneamente todos ou pelo menos grande maioria dos furos contido numa peça, diminuindo assim o tempo gasto com a produção da peça. Essa tecnologia marcou uma fase da evolução do processo de furação que antecedeu a fase atual, quando se passou a direcionar as atenções para as novas geometrias e materiais para produção das brocas (DEGARMO, 1979; FREIRE, 1978). Um exemplo de máquina-ferramenta com vários mandris (polimandril) pode ser observado na Figura 6.

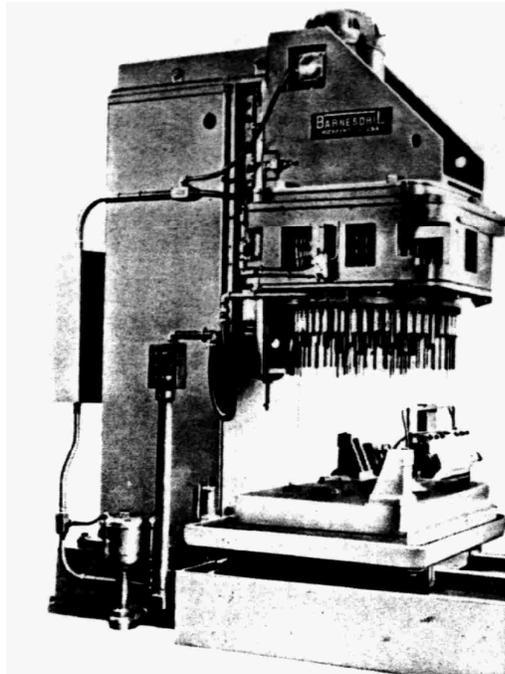


FIGURA 6- EXEMPLO DE UMA FURADEIRA COM CABEÇOTE POLIMANDRIL

FONTE: (FREIRE, 1978).

As máquinas com cabeçotes polimandrill, no entanto, apresentavam o problema de serem máquinas com utilização limitada, dada suas características de configuração pouco flexível. Atualmente, centros de usinagem vêm sendo utilizados para realizar operações de furação quando se deseja aliar altas velocidades de corte à flexibilidade de operação.

Ainda dentro do processo de inovação pode-se citar, como mostra a Figura 7, a incorporação de vários conceitos inovadores em apenas uma ferramenta. Pode-se destacar o uso de novas geometrias de aresta transversal em “S” e de substratos de metal duro cada vez mais tenazes, com propósito de amenizar o problema enfrentado com a velocidade de corte no centro da broca; existe ainda a questão do reforço das coberturas PVD com ou sem refrigeração interna (SOTO, 2000).



FIGURA 7- ALTERNATIVAS MODERNAS EM BROCAS DE METAL DURO.

FONTE (SOTO, 2000).

2.4. ELIMINAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE NA FURAÇÃO

As funções principais dos fluidos refrigerantes/lubrificantes são: reduzir a geração de calor pela redução do atrito, eliminar a influência do aumento da temperatura do conjunto ferramenta/peça/máquina, transportar/remover os cavacos gerados durante o processo, além de proteger a peça e a máquina contra a corrosão atmosférica (KLOCKE & EISENBLATTER, 1997).

Apesar dos fabricantes de fluidos para usinagem apresentarem várias nomenclaturas para definir os tipos de fluidos, quimicamente os fluidos de corte são divididos em dois grandes grupos:

- ✓ Os fluidos integrais ou óleos puros isentos de água; e.
- ✓ Os fluidos a base de água.

Os fluidos de cortes, no processo de usinagem, assumem duas propriedades de atuação: como lubrificantes ou refrigerantes.

Os sistemas água/óleo foram logo introduzidos e oferecem a vantagem da refrigeração proporcionada pela água e da lubrificação imprimida pelos derivados de petróleo. A eles são adicionados aditivos de extrema pressão, de controle de crescimento microbiológico, além de protetivos anticorrosivos (NOVASKI e RIOS, 2001).

A seleção correta do fluido de corte mais adequado para uma determinada operação de usinagem não é uma tarefa simples. Exige uma avaliação criteriosa dos diversos aspectos envolvidos. Quando aplicados corretamente, os fluidos de corte podem aumentar a produtividade e reduzir custos, tornando possível a utilização de maiores velocidades de cortes, avanços e profundidades de cortes. Além disso, aumentam a vida da ferramenta, melhoraram o acabamento superficial da peça usinada e diminuem a potência de corte consumida (RODRIGUES e ABRÃO, 1999).

Por outro lado, os custos associados ao emprego do uso do fluido de corte correspondem algo entre 14 e 16% do custo da usinagem (KONIG, 1998). MULLER (2000) procura apresentar como se dá essa correspondência e indica em que nível cada uma dessas componentes pode ser reduzida (Figura 8).

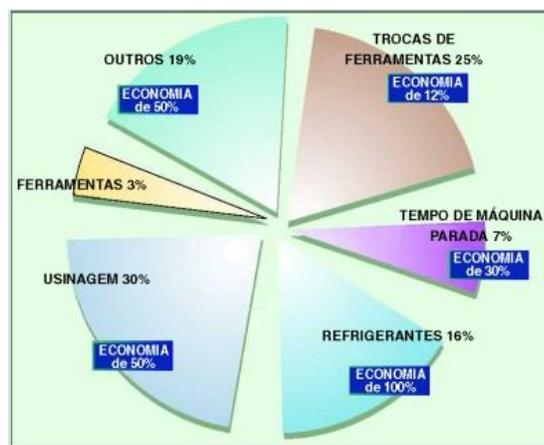


FIGURA 8 - O IMPACTO DOS LÍQUIDOS REFRIGERANTES NOS CUSTOS TOTAIS DE USINAGEM

FONTE: (MULLER, 2000).

Os custos com o uso do fluido de corte podem ter uma economia de até 100% no caso da aplicação da furação sem o uso de fluidos de corte. Outros custos também podem ser reduzidos a partir de trabalhos voltados para a redução do desgaste da ferramenta (redução de até 12%) ou otimização do processo (redução de até 50%).

Dessa forma, além de buscar trabalhar com parâmetros otimizados, passou-se a trabalhar sem o uso de fluidos de corte, visando a eliminação de resíduos e a redução dos custos de produção, tendo em vista os preços dos lubri-refrigerantes e dos equipamentos envolvidos na lubri-refrigeração (por exemplo, os cuidados para evitar o desenvolvimento de bactérias nos tanques de armazenagem) (NAKAGAWA, 2000).

O custo do uso de fluidos de corte se tornaram acentuados devidos, principalmente, ao alto consumo e aos descartes constantes que confrontam diretamente as políticas de preservação ambiental. É necessário encontrar sistemas compatíveis com a operação, com o usuário e com a preservação ambiental.

Grandes preocupações de caráter ambiental vêm sendo levantadas nos últimos anos como consequência das exigências mercadológicas (ISO14000 e “selo verde”). Trabalhos a respeito da eliminação da utilização de produtos que geram resíduos químicos (cloro, enxofre e fósforo) nocivos ao homem e a natureza têm sido desenvolvidos, dentre os quais os fluidos lubri-refrigerantes utilizados nos processos de usinagem (em especial o de furação) (SALES, 1998).

Dentro das tendências mundiais de controle ambiental, cada vez mais rigorosas e com um enfoque para uma manufatura que não cause danos ao meio ambiente (NAKAGAWA, 2000), tais exigências estão contidas em normas de elevada importância para empresas que almejam o reconhecimento de “Empresa de Classe Mundial” (“World Class Enterprise”) ou que visam parceria com estas (CARDOSO, 2000).

Na última década muito se tem pesquisado com o objetivo de restringir ao máximo o uso de fluido refrigerante e/ou lubrificante na produção metal-mecânica. Além dos custos operacionais da produção e das questões ambientais, existem exigências legais quanto a questões ligadas à saúde do ser humano devido ao contato do fluido refrigerante com sua pele, a respiração e/ou ingestão de poluentes derivados dos mesmos. (BRAGA, 2001; HEISEL & LUTZ, 1998; KALHOFER, 1997; SALES et al, 1998, LIMA et al, 2001, KLOCKE et al, 1997).

Atualmente, ao se abordar sistemas de manufatura, o principal foco é o aumento da produtividade aliada à redução de custos. Nas operações de usinagem a utilização de fluidos de corte adequados à operação é uma alternativa de incremento da produtividade que deve ser incluída nas análises do processo.

Ao se trabalhar com furação em alta velocidade de corte (HSC) é necessário o uso de alta pressão na injeção do fluido, pois só assim se consegue atingir a zona de contato (peça/broca). O fluido deve ser resistente à evaporação, pois nessas situações ele se encontra mais propício a evaporar devido às condições de pressão e temperatura a que é submetido. Além disso, não se pode deixar de salientar o fato de que ao se injetar fluido com alta pressão, este passa a ser uma espécie de barreira na extração dos cavacos.

Na usinagem sem fluido de corte, o atrito e adesão entre ferramenta e peça aumentam devido ao aumento da carga térmica envolvida no processo. Isso propicia aumentos significativos no desgaste da ferramenta, na formação de crateras e de cavacos alongados que trazem problemas, especialmente em processos de furação. Essas dificuldades podem ser minimizadas atualmente com a utilização de ferramentas revestidas e com geometria modificada (KLOCKE et al, 1997).

2.5. ELIMINAÇÃO DO FLUIDO DE CORTE E FERRAMENTAS PARA FURAÇÃO

Com a tendência de redução da utilização do fluido de corte em operações de usinagem, existe uma preocupação em desenvolver ferramentas com geometrias especiais de quebra de cavaco para um melhor controle de descarga de cavaco e também nos próprios desenhos das ferramentas para prevenir o desgaste prematuro das arestas de corte em operação sem o fluido de corte. A escolha do material para a confecção da ferramenta é tão importante quanto à geometria da ferramenta escolhida, pois dessa escolha decorrem as características de dureza da ferramenta sob condições de altas temperaturas e resistência ao desgaste (SCANDIFFIO, 2000).

É importante salientar que o substrato das ferramentas de metal duro direcionadas ao corte sem lubri-refrigeração, deve ser produzido a partir de pós ultrafinos, cujo tamanho das granulações são menores que $0,3 \mu\text{m}$, e com altas resistência ao calor. Essas características possibilitam a obtenção de arestas de cortes mais afiadas, o que gera menos calor ao se comparar com as ferramentas de metal duro tradicionais. Estes pós-ultrafinos proporcionam às ferramentas uma resistência ao desgaste de aproximadamente 60% a 70% maior do que as obtidas com os pós-convencionais de metal duro (tamanho de grão de aproximadamente 2,5 microns) (CSELLE, apud SCANDIFFIO, 2000).

Para completar o processo de obtenção de uma boa ferramenta para condições de usinagem sem o fluido de corte, acrescenta-se às características citadas os revestimentos de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio, os quais são fundamentais para suprir os efeitos da deficiência de lubrificação na região de corte. Segundo DUNLAP (1997) tais revestimentos reduzem o atrito e a adesão, funcionando como uma espécie de “lubrificante sólido”. Além disto, a carga térmica no substrato é diminuída pela baixa condutividade térmica da camada de cobertura. A redução na dissipação de calor pela ferramenta muda o fluxo de calor entre a ferramenta e o cavaco, o que leva o cavaco a dissipar mais calor do que o

normal, aumentando-se, assim, o tempo de corte devido à redução do desgaste das arestas de corte (SCANDIFFIO, 2000).

3. MACRO E MICRO DETERMINANTES DA QUALIDADE (MMDQ)

Dá-se o nome de Macro e Micro Determinantes da Qualidade (MmdQ) ao conjunto de características e ocorrências geradas em peças pós usinagem. De uma maneira geral, as peças submetidas a qualquer processo de usinagem são possuidoras de fatores determinantes de qualidade que fazem parte da identidade das peças.

Os MmdQ escolhidos para análise dos corpos de prova, objetos principais de estudo deste trabalho, estão concentrados nos erros de forma, dimensional e localização, que são macro determinantes, e nas características superficiais e sub-superficiais dos furos (tensão, micro-dureza e camada afetada), que são os micro determinantes.

O interesse por esse conjunto de MmdQ justifica-se pelas seguintes razões:

- ✓ O atendimento às regras gerais de tolerâncias geométricas é requisito básico de qualidade de furos. É importante salientar que o diâmetro, o perpendicularismo e a localização do furo são parâmetros de fundamental importância para uma qualidade aceitável da peça (GRIFFITH, 1994; PUNCOCHAR, 1996; AGOSTINHO, 1977);
- ✓ A existência de efeitos mecânicos e térmicos que afetam a camada superficial nos processos de usinagem, conforme mostra a Figura 9 (JACOBUS et al, 2000).

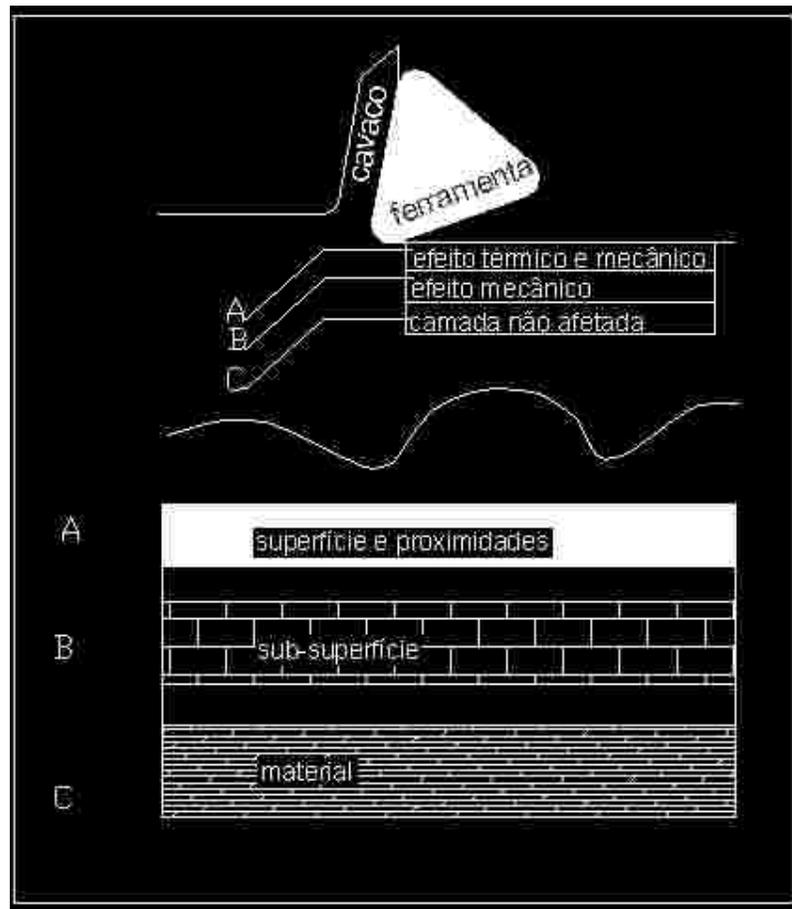


FIGURA 9 - ESQUEMATIZAÇÃO DOS EFEITOS TÉRMICOS E MECÂNICOS EM PEÇAS USINADAS.

FONTE: (JACOBUS ET AL, 2000).

A Figura 9 caracteriza o momento de remoção de material numa operação de usinagem. A peça foi subdividida em três porções para compreensão: A, B e C, que se diferenciam pelo tipo de solicitação a que são expostas. Na porção A, superfície da peça e proximidades, ocorre uma espécie de combinação de solicitações térmicas e mecânicas. Na porção B, sub-superfície da peça, ocorre uma possível solicitação mecânica. Já na porção C, núcleo do material, fica uma região não afetada pelas solicitações. São nas porções A e B onde surgem as principais alterações dos micros determinantes da qualidade.

A seguir são feitas algumas conceituações e discussões sobre os MmdQ de interesse, destacando sua influência sobre o resultado final do processo de furação.

3.1. DESVIOS DIMENSIONAIS E DE LOCALIZAÇÃO

O processo de obtenção de uma peça subentende todo o tempo dispendido, na sua concepção, projeto e execução. Essas fases trazem as definições dimensionais, as tolerâncias de fabricação e todo um conjunto de informações que na maioria dos casos acabam sendo insuficientes para se afirmar com exatidão em qual padrão de qualidade as peças se enquadram depois de prontas (GRIFFITH, 1994; PUNCOCHAR, 1996).

Pela comparação da peça real fabricada com a peça ideal especificada pelo projeto e retratada pelo desenho, pode-se afirmar que estas apresentam diferenças significativas. O grau de diferenciação entre a peça real e a peça projetada caracteriza a precisão de fabricação, e é determinado pela qualidade da usinagem executada. Isso é normalmente previsto na fase de projeto, e vem previamente especificado na forma das chamadas tolerâncias dimensionais e de localização (AGOSTINHO et al, 1977; MATEOS, 1974; PUNCOCHAR, 1996; GRIFFITH, 1994).

Estes desvios surgem durante a execução da peça pelas máquinas ferramentas e são provocados, na maioria das vezes, pela inexatidão dos processos em quesitos como rigidez da máquina, desgaste da ferramenta, parâmetros de usinagem adotados para o processo e outros inúmeros fatores que influenciam diretamente na qualidade final de uma peça usinada (BALAKSHIN, 1983; GRIFFITH, 1994).

Num projeto de uma determinada peça deve-se prever, além das tolerâncias de ajuste e de fabricação, também as chamadas tolerâncias geométricas ou desvios geométricos, com o propósito de obtenção da melhor qualidade funcional possível (NOVASKI, 1998).

Em todas as peças acabadas, obtidas com ou sem remoção de cavaco, pode-se notar não somente os desvios permitidos pelas tolerâncias correspondentes, como também outros tipos de desvios. NOVASKI (1998) os define como macro-geométricos (quando relacionados à forma e à localização) e micro-geométricos (quando relacionados à rugosidade superficial).

Dentre os desvios macro-geométricos ocorridos num processo de usinagem pode-se apontar que entre os principais desse grupo estão os desvios de dimensão, paralelismo, perpendicularismo, forma circular (circularidade), de forma cilíndrica (cilindricidade), de ângulo, e de localização (MATEOS, 1974).

Nesse trabalho os desvios macro-geométricos mais focados são os desvios de dimensão (diâmetro), perpendicularismo e localização (posição dos furos). Tais desvios foram escolhidos tendo como base às características dos ensaios, que se assemelham a um processo de desbaste ou fase inicial da execução do furo, que precede de uma etapa de calibração do furo feito por uma ferramenta de maior sensibilidade ao desgaste, por isso o controle do diâmetro é de fundamental importância para o não desgaste excessivo dessa ferramenta, isso é apenas um dos motivos da escolha destes desvios como objeto de análise.

3.1.1. DESVIOS DE DIMENSÃO - DIÂMETRO

Os desvios de dimensão estão relacionados a problemas ocorridos nos processos de fabricação: desgaste de ferramentas, deformações do conjunto MFDP (máquina - ferramenta - peça - dispositivo), dilatações térmicas, entre outros (LIRANI, 1985).

Dentre os desvios que ocorrem no processo de furação, a variação dimensional do diâmetro é o mais freqüente, sendo normalmente associado aos desvios de circularidade e de cilíndricidade. Considerando-se que um furo deve ser utilizado como um elemento funcional para a passagem de outro elemento (pino, eixo, parafuso, etc), a variação de diâmetro pode ser considerada crítica em peças furadas (FARAGO & CURTIS, 1994).

3.1.2. DESVIOS DE PERPENDICULARISMO

É considerado que o ângulo reto é uma criação da mente humana, porque na natureza sua presença não é deliberada. Nos produtos criados pelo homem, porém, seja em arquitetura, em comércios ou indústria, em engenharia civil, o ângulo reto, vem sendo buscado como o resultado da perpendicularidade mútua das linhas e superfícies, e esteve presente desde os tempos antigos. Isso justifica a aplicação variada e intensa do ângulo reto em muitos casos. Eles podem ser relacionados à conveniência técnica e às viabilidades operacionais, mas também para conceitos menos distintos; eles poderiam refletir para a mente humana, a qual procura por uma expressão de regularidade ou uma definição matematicamente definível (FARAGO & CURTIS, 1994).

O desvio de perpendicularismo se aplica para caracterizar elementos funcionais e/ou construtivos que necessitam ter uma relação angular de 90° entre suas partes, como uma interface de superfícies. Deve garantir o posicionamento axial de furos em relação à superfície de uma peça, propiciando que esses furos possam ter a função de elemento de fixação ou de orientação (furo-guia) (GRIFFITH, 1994; PUNCOCHAR, 1996).

Para o caso específico de furos, o desvio de perpendicularismo é verificado através de uma zona de tolerância contida entre dois planos paralelos de

revolução que caracterizam um cilindro, compartilhando um mesmo eixo axial da superfície analisada. Esses planos devem estar referenciados por uma superfície da peça, em geral a superfície de entrada do furo, como mostra a Figura 10 (GRIFFITH, 1994).

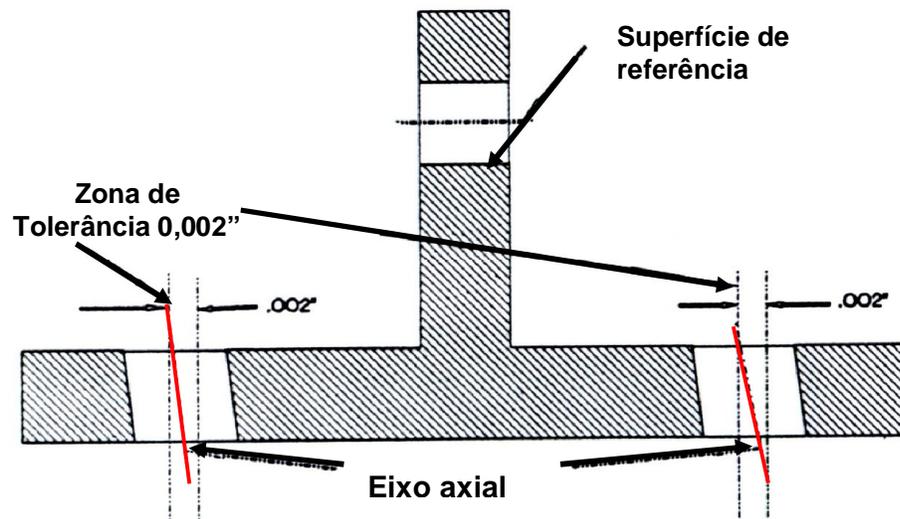


FIGURA 10 – EXEMPLO DE DESVIO DE PERPENDICULARISMO PARA FUROS

FONTE: (GRIFFITH, 1994).

A presença do ângulo reto em uma peça geométrica é de muita importância operacional, por exercer um papel fundamental na engenharia de desenvolvimento e obtenção de produto. Conseqüentemente, perpendicularismo representa uma condição que deve ser freqüentemente medida em peças ou em partes dessas peças (FARAGO & CURTIS, 1994).

3.1.3. DESVIO DE LOCALIZAÇÃO

O desvio de localização é um tipo de desvio que pode ser definido como a diferença entre uma aresta, superfície ou elemento da peça em questão e a localização teórica prescrita pelo projeto da peça. Essa localização teórica é determinada por tolerância de ângulo e distância baseado em um sistema de

referência adotado previamente na própria peça (arestas ou superfícies); este sistema de referência é baseado em coordenadas cartesianas ou polares (AGOSTINHO, 1977).

Em usinagem de furos de fixação de tampas, que devem ser fixadas em carcaças através de parafusos e pinos de guia, esta especificação torna-se fundamental para garantir intercambiabilidade de montagem. O desvio de localização será limitado através da tolerância de localização (T_L), que pode ser apresentada de três formas:

- ✓ Tolerância de localização do ponto;
- ✓ Tolerância de localização da reta;
- ✓ Tolerância de localização do plano.

Para o presente trabalho o interesse recai sobre a tolerância de localização de um ponto, que é determinada por uma superfície esférica ou um círculo com diâmetro T_L , cujo centro está determinado pelas medidas nominais, A e B, conforme ilustra a Figura 11. Esta tolerância é bastante aplicada em furação de chapas.

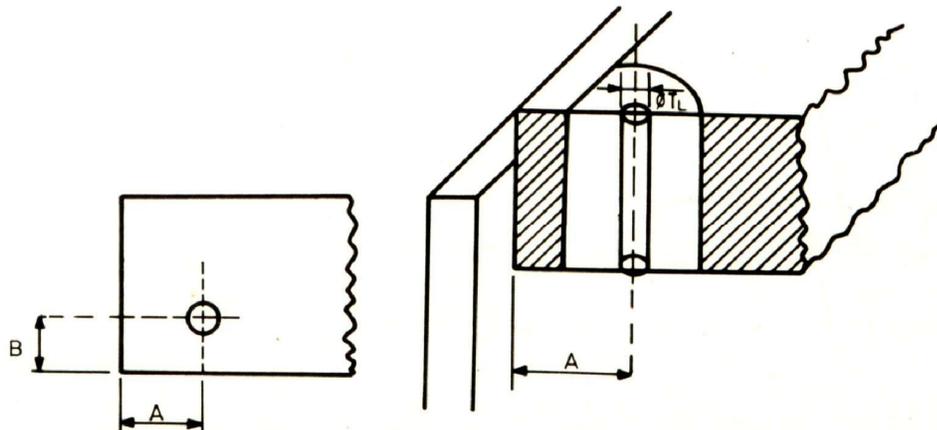


FIGURA 11- EXEMPLO DE TOLERÂNCIA DE LOCALIZAÇÃO DE PONTO

FONTE: (AGOSTINHO, 1977).

A tolerância de localização tem seu grau de complexidade aumentado a medida que se busca maior quantidade e qualidade das informações colhidas no processo de análise. Esta complexidade também depende do formato da peça ou objeto a ser inspecionado (Figura 12).

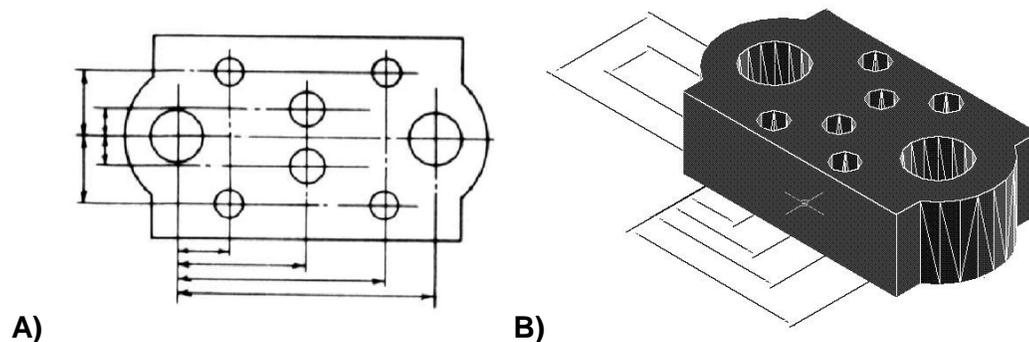


FIGURA 12 – EXEMPLOS DE TOLERÂNCIA DE LOCALIZAÇÃO

Na Figura 12 são destacados dois diferentes tipos de peças, A e B, embora com a composição e a disposição dos furos semelhantes, variando apenas sua espessura. Nesse caso se tomarmos como base de análise a simetria das faces superior e inferior da peça B, estaremos inserindo uma variável em relação à análise da peça A, a qual seria a diferença de posição do eixo axial do furo que pode vir a interferir nas coordenadas de uma face para a outra. Uma das causas dessa variação, por exemplo, pode ser dada a partir de um desvio de perpendicularismo.

3.2. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

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

A ocorrência de danos à 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 de trincas (VIEIRA et al, 1998).

O comprometimento da integridade superficial das peças usinadas pode ser definido pelas alterações de superfície, que são resultantes das solicitações dos processos usinagem utilizados para a sua obtenção (COSTA, apud DAMASCENO, 1993). Dentre os tipos de alterações de superfícies associados a trabalho de remoção de cavaco podem-se citar:

- ✓ Microdureza;
- ✓ Rugosidade superficial (que não é de interesse do presente trabalho);
- ✓ Alterações de superfície e sub-superfície (CAC – Camada Afetada pelo Calor);
- ✓ Tensões residuais.

Os fatores de interesse para o presente trabalho são mais bem detalhados a seguir.

3.2.1. CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC)

A análise da CAC, também identificada como *HAZ – Heat affect zone*, vem ganhando espaço no cenário da usinagem. Bastante conhecida nos processos de soldagem, a CAC vem se mostrando muito útil e eficaz como uma ferramenta de averiguação da qualidade dentro de uma concepção 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 (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 a separação do material da peça;
- ✓ O atrito entre ferramenta e peça;
- ✓ O atrito entre o cavaco e a ferramenta.

A dissipação do calor gerado na região de corte pode se dar através da ferramenta, da peça, do fluido de corte e da dissipação no ar. As duas primeiras formas são indesejáveis por acelerarem o processo de desgaste da ferramenta e por poderem promover a formação da CAC, pois as temperaturas na região de formação de cavaco chegam até a 1000°C (SNOEYS apud ABRÃO, 1991). Com a elevação da temperatura e o posterior resfriamento na peça, cria-se uma condição propícia para o surgimento de camadas de martensita pura (α'). Segundo SHAW (1994), apesar de não haver um longo tempo de exposição às temperaturas elevadas, como ocorre nos tratamentos térmicos, a mudança de fase ocorre 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 voltar à Figura 9, onde está bem ilustrado o que ocorre com a estrutura do material em determinadas porções da superfície em direção ao centro da peça.

Além do processo de furação outros processos de usinagem vêm adotando a formação da CAC como parâmetro de análise de danos à camada superficial, como é o caso de SPUR e TIO (1991), LIMA et al (2001) e LIMA & VIEIRA (2002), que utilizaram esta análise voltada para o processo de retificação.

3.2.2. MICRODUREZA

A dureza é largamente utilizada na especificação de materiais, nos 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). Por 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;
- ✓ Na retificação a dureza de rebolos é associada à resistência das ligas dos rebolos em reterem os grãos abrasivos (VIEIRA, 1996).

Dessa maneira não é possível encontrar uma definição única de dureza que englobe todos esses conceitos, mesmo porque para cada um desses significados de dureza, existem uma ou mais formas de medição indicados.

Sob este ponto vista, pode-se dividir o ensaio de dureza em três tipos principais, que dependem da maneira na qual o ensaio é conduzido (SOUZA, 1982):

- 1) Por penetração de um material mais duro em outro. A dureza é medida em função da carga aplicada e da profundidade da impressão deixada pela penetração;
- 2) Por choque entre dois materiais, sendo um de dureza conhecida. A dureza é associada a valores de energia mecânica envolvida no processo de medição;

- 3) Por riscamento, no qual um material de dureza conhecida (em geral o diamante) é posto em contato com o material de interesse e faz-se um deslizamento, que deixa uma impressão (risco). A dureza é associada às dimensões dessa impressão.

O primeiro tipo citado foi o utilizado para a análise desenvolvida no presente trabalho, mais precisamente com o uso de medições de microdureza Vickers.

O princípio de medição pelo método Vickers é o 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, os métodos 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 1,00Kgf a 120,00Kgf 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 13, e pela média L (equação 1) das suas diagonais ao quadrado obtém-se a área da superfície identificada; ao se dividir o valor da carga aplicada por essa área tem-se a leitura da dureza Vickers dada em Kgf/mm^2 , conforme demonstra a equação 1 (SOUZA, 1982).

$$\text{HV} = 1,8544 \times P / L^2 \dots\dots\dots(1),$$

Onde: $P \rightarrow$ carga aplicada, em Kgf

$L \rightarrow$ média das diagonais da impressão

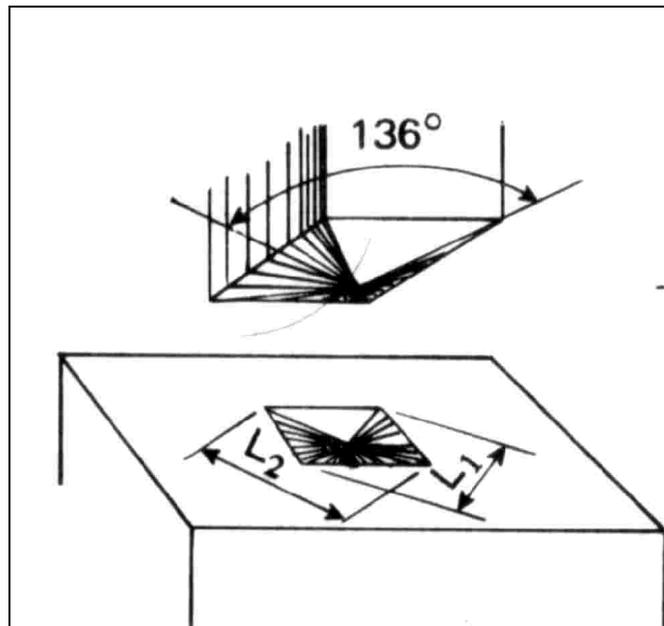


FIGURA 13 – PENETRADOR E IMPRESSÃO VICKERS

FONTE: (SOUZA, 1982).

A área da impressão deve ser medida com precisão através de microscópio luminoso acoplado à máquina para a determinação das diagonais com grande precisão (cerca de $1\ \mu\text{m}$). A pré-carga é aplicada levemente na superfície plana da amostra, por meio de um pistão e é mantida durante cerca de 10s; a carga total é aplicada por mais 15s, com tolerância de 2s (ASTM E384-99).

As principais vantagens do método Vickers são (MARIN, apud SOUZA, 1982):

- ✓ Escala continua;
- ✓ 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).

3.2.3. TENSÕES RESIDUAIS

As análises de tensões evidenciam que a falha do componente está geralmente relacionada com defeitos de superfícies que surgem já no estágio de manufatura (conformação, sinterização, etc) ou como resultado de um processo subsequente da remoção de cavaco. 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 e TIO, 1991).

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 necessário 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 a fadiga dos materiais, ou seja, quando as tensões são do tipo compressivas, são benéficas, melhoram a resistência à fadiga do material, no entanto quando são de tração, dependendo da sua magnitude, são maléficas, contribuem para declínio da resistência do material (DAMASCENO 1993; VIEIRA et al, 1998).

Durante a formação do cavaco do momento de usinagem, ocorre a produção de altas forças de restauração, induzindo 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 aumenta-la no caso de ser tração (SPUR e TIO, 1991; DAMASCENO, 1993).

4. PROPOSTA DO TRABALHO

Considerando-se o conjunto de MmdQ descrito no capítulo anterior, identifica-se que nas operações de furação, em especial as realizadas sob condições otimizadas, é possível a ocorrência de problemas na peça advindos do processo.

Por ser realizada, geralmente, sem fluido de corte e sob condições severas de usinagem, a furação otimizada está envolvida com altas temperaturas na região de corte e com altas forças de usinagem (Figura 14).



FIGURA 14 - IMAGENS DA FURAÇÃO DO CORPO DE PROVA

Na Figura 14 são retratadas duas imagens obtidas em momentos diferentes da realização do ensaio: a imagem da esquerda mostra uma situação com o ensaio pela metade, ou seja, já haviam sido realizados aproximadamente duzentos e cinquenta furos. Pode-se observar na broca um intenso aquecimento e nas proximidades do furo. A outra imagem da Figura 14 (à direita), retrata o comportamento da ferramenta e dos cavacos em condições de fim de vida da broca, ou seja, ao término do ensaio. Ainda na Figura 14, nota-se um superaquecimento generalizado entre o conjunto ferramenta/peça/cavaco, cenário propício para o surgimento dos problemas com os MmdQ.

O presente trabalho traz como proposta de estudo a utilização dos conceitos propostos de MmdQ para avaliar a viabilidade da estratégia de otimização do processo utilizada.

Para tanto, pretende-se realizar um conjunto de análises dos MmdQ a fim de identificar, através desses parâmetros, os momentos nos quais a utilização da operação otimizada passa a inserir no processo problemas de qualidade e não conformidades devido ao desgaste excessivo da ferramenta. Além disso, insere também elevação de custos por aumentar o desgaste geométrico da ponta da broca e dos revestimentos utilizados, impossibilitando seu reaproveitamento através de reafiações, o que implica na aquisição de novas brocas.

É importante salientar que devido ao fato de já existirem resultados de operações otimizadas não foram realizados novos ensaios de furação, pois tais resultados estariam sendo repetidos na íntegra. As estratégias de otimização adotadas para realização destes ensaios seriam as mesmas utilizadas anteriormente por MIRANDA et al, 2001, tendo em vista o fato de que esta estratégia é das mais utilizadas.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os equipamentos e os materiais necessários para o desenvolvimento do trabalho, bem como os métodos de medição e análise de resultados utilizados são descritos a seguir.

5.1. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FURAÇÃO

Para a realização da análise proposta neste trabalho, foram utilizados corpos de prova usinados em condições otimizadas de usinagem ($V_{m\text{xp}} = 163 \text{ m/min}$; $f = 0,18 \text{ mm/ver}$). Esses ensaios foram realizados por MIRANDA et al (2001), e visavam obter os limites de utilização de brocas inteiriças de metal duro. Esses ensaios fizeram parte de um estudo cujo escopo direcionava-o para uma outra linha de pesquisa que visava obter a produtividade das ferramentas nas condições limites de processo.

Para o presente trabalho os corpos de prova foram confeccionados em aço-liga ABNT 4340 e os furos foram usinados em dois tipos de corpos de prova. O primeiro tipo (CP1) que é uma placa da liga com dimensões 430 x 310 x 32 mm, no qual usinou-se a maioria dos furos, simulando-se assim a produção com a finalidade de provocar o desgaste da broca. Depois de usinada uma série de 16 furos de diâmetro 10 mm, foi furado um segundo tipo de corpo de prova (CP2 - de dimensões 41 x 41 x 32 mm) preso a um dinamômetro. Durante a usinagem dos furos realizados neste corpo de prova CP2 (MIRANDA et al, 2001) monitorou-se o momento torçor (M_t) e a força de avanço (F_f). Os desenhos dos dois tipos de corpos de prova podem ser vistos nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

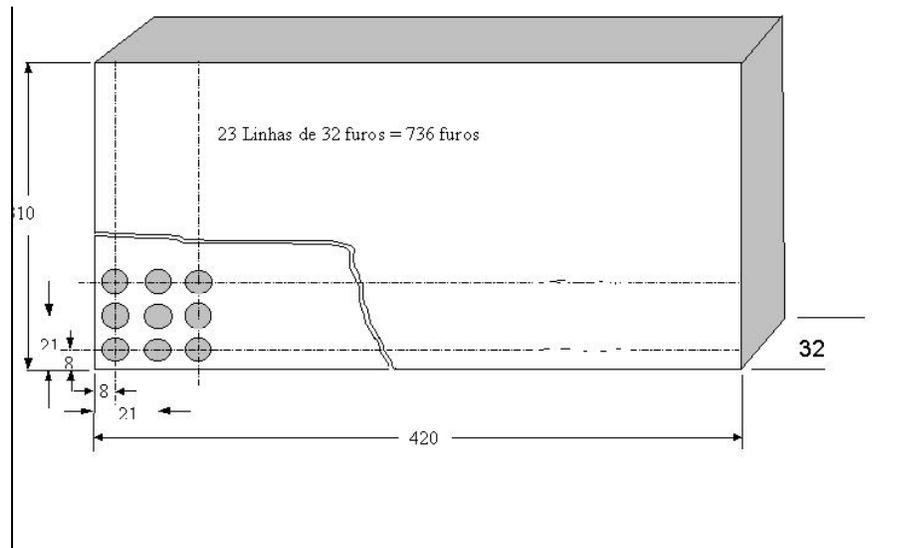


FIGURA 15 - CORPO DE PROVA CP1 420X310X32 MM

FONTE: (MIRANDA ET AL, 2001)

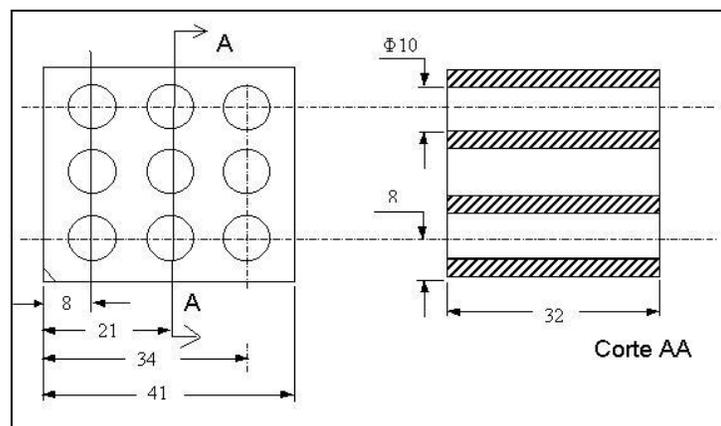


FIGURA 16 - CORPO DE PROVA CP2 41X41X32 MM (MIRANDA ET AL, 2001)

Nas Figuras 15 e 16, estão esboçadas as disposições dos furos e as dimensões dos corpos de prova envolvidos nos ensaios. É possível observar detalhes importantes como a distância entre furos, a espessura das chapas, entre outros.

As ferramentas utilizadas, selecionadas através de catálogo TITEX PLUS, foram brocas inteiriças de metal duro P40, com diâmetro nominal 10mm, tipo ALPHA 2 versão direita, conforme a Norma DIN 6537K e DIN 6535HA para a haste, com cobertura TINAL FUTURA (modelo A3265 TFL). A utilização indicada em catálogo é para a usinagem de aços e materiais fundidos, especialmente adequada para usinagem sem refrigeração de aços carbono. Para a usinagem do aço liga ABNT 4340 a recomendação de catálogo é a utilização de óleo solúvel ou óleo como fluido de corte. O sistema de fixação da ferramenta utilizado foi o Hidro – Grip Coromant Capto, cone modelo C5-390.272-40/040 e o mandril modelo C5-391.CGA-20/074, ambos da SANDVIK®. A excentricidade (batimento para o conjunto broca e sistema de fixação), verificada por amostragem foi em média da ordem de 0,010 mm. A profundidade dos furos passantes de 32 mm permitiu garantir, a relação entre o comprimento do furo e o diâmetro da broca igual a 3,2. A verificação da excentricidade da aresta principal de corte da broca pode ser vista na Figura 17.



FIGURA 17 - VERIFICAÇÃO DA EXCENTRICIDADE

No presente trabalho, a análise dos corpos de prova envolveu dois momentos distintos: a avaliação do comportamento dos macro determinantes da qualidade (perpendicularismo, localização e diâmetro) e a avaliação do

comportamento dos micro determinantes da qualidade (micro dureza, integridade da camada superficial e subsuperficial da peça furada).

5.2. ANÁLISE DOS MMDQ

Nesse item procura-se descrever como foram realizadas as análises dos macro e micro determinantes de Qualidade da peça, ao longo do trabalho.

5.2.1. ANÁLISE DIMENSIONAL E DE LOCALIZAÇÃO

Para a avaliação do comportamento dos macros determinantes de qualidade adotou-se a medição dos corpos de prova em uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), com o objetivo de identificar o erro de dimensão (diâmetro) encontrado nos furos realizados, verificar o perpendicularismo do eixo de trabalho da máquina-ferramenta em relação ao plano de referência adotado para a medição, e também verificar a ocorrência de erros de posicionamento dos furos como decorrência do desgaste das brocas. A MMC utilizada foi uma Starrett, modelo DCC - RGDC 2828-24.

O procedimento de medição adotado, pode ser melhor explicado se decomposto em etapas:

- ✓ O corpo de prova (CP) é posicionado no desempenho da máquina (plano de apoio de máquina) apoiado em três pontos, por meio de três suportes específicos para esse fim e com regulagens milimétricas de ajuste de altura (Figura 18):
- ✓ Para certificar o nivelamento estático do CP, em relação ao plano de apoio máquina, realiza-se um zeramento do CP por meio de relógios comparadores, tomando como base para isso regiões próximas aos três pontos de apoio;



FIGURA 18 - EXEMPLO DE POSICIONAMENTO DO CP

- ✓ Realiza-se o zeramento do apalpador e o referenciamento da máquina, procedimentos de rotina que antecedem uma seqüência de medição;
- ✓ Passa-se então à elaboração do programa CNC para a execução automática das medições;
- ✓ Define-se um plano de referência para máquina, por meio de 12 pontos ao longo da superfície superior do corpo de prova, pontos esses distribuídos de maneira aleatória com preocupação apenas em mapear toda a superfície;
- ✓ Definem-se duas linhas de referência perpendiculares entre si, as quais têm o papel de orientar a máquina, com relação às disposições dos furos no CP;
- ✓ A seqüência de medição adotada foi a mesma adotada para a execução dos furos, ou seja, o primeiro furo usinado também deve ser o primeiro furo medido e assim por diante. Essa estratégia é adotada com propósito de reproduzir ao máximo as condições sofridas pelo CP ao longo dos ensaios;

- ✓ Para medições automatizadas, o programa gera uma rotina de repetições que são realizadas tomando como guia de movimentação as retas geradas na fase inicial do programa;
- ✓ No caso de uma das colunas de furo do corpo de prova (ultima coluna) não estar concluída ao fim da vida da broca, faz-se necessária à realização de duas medições: - uma para as colunas de furo concluídas e uma apenas para a ultima coluna (Figura 19);

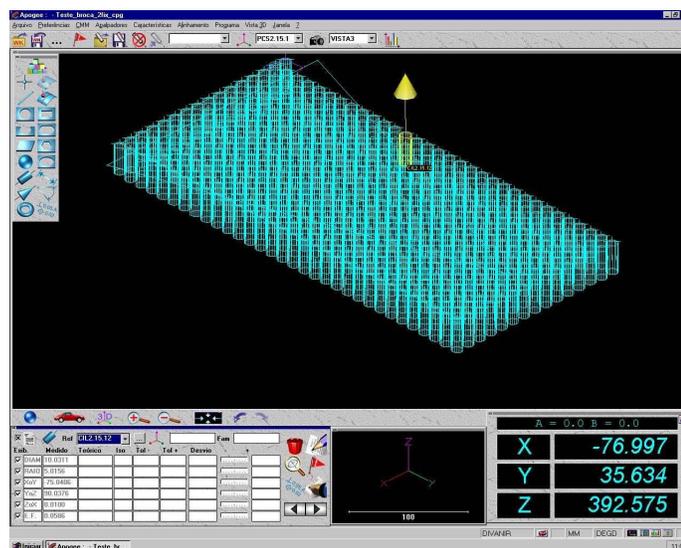


FIGURA 19 - EXEMPLO DE MEDIÇÕES PARA COLUNAS CONCLUÍDAS

- ✓ Definido o programa inicia-se as medições dos furos;
- ✓ Os dados obtidos na medição são exportados como um arquivo texto para posteriormente serem processados no Excel. Procura-se levantar as curvas de comportamento das grandezas mensuradas (diâmetro, localização e perpendicularismo) ao longo da vida da broca.
- ✓ Só assim chega-se aos valores das grandezas mensuradas de uma forma que possibilite uma manipulação desses valores externamente ao ambiente do “software” da Máquina de Medir Por Coordenadas.

5.2.2. ANÁLISE DA CAC

Nesse item procurou-se demonstrar como deve ser realizada a análise da CAC. É importante salientar que a base para esta análise concentra-se na utilização de recursos de aquisição e análise de imagem. Para tanto, foi utilizada uma câmera CCD Hitachi, monocromática, acoplada a um microscópio metalográfico. A imagem captada pela câmera foi analisada com o auxílio do "software Global-Lab Image View", específico para a análise de imagens. A seguir é descrito o procedimento de aquisição e análise adotados:

- ✓ O início dessa análise é marcado pelo corte dos corpos de prova, que deve ser realizado em duas etapas: na primeira etapa utiliza-se como ferramenta uma serra hidráulica industrial de fita, com a qual o corpo de prova é dividido em quatro pedaços, devido às suas dimensões não serem compatíveis com os equipamentos de "Cut-Off" metalográficos. Nessa etapa toma-se cuidado para que o corte não seja realizado nas proximidades das regiões que serão submetidas a futuras análises, tendo em vista o fato de que esta máquina não é apropriada para fins metalográficos. Assim sendo poderia acarretar danos à superfície da peça que poderiam vir a comprometer os resultados analisados;
- ✓ Após a separação do corpo de prova em 4 pedaços, torna-se então possível à execução do corte em um equipamento direcionado para a área de materiais (Cut-Off), onde o corpo de prova foi cortado de 16 em 16 furos, para a extração de uma pequena amostra da seção transversal destes furos. A quantidade de furos para o corte da amostra foi estipulada com base na frequência de amostragem utilizada por MIRANDA et al (2001) para a medição do momento e das forças de corte;
- ✓ Após a obtenção das amostras, previamente identificadas, passa-se à fase de embutimento destas. Este embutimento deve ser realizado em baquelite através de uma máquina específica para este fim

(embutideira), para evitar a formação de interfaces entre a amostra e o embutimento, também chamada de “efeito borda”;

- ✓ Segue o preparo metalografico, que subentende a fase de lixamento, polimento e ataque (nital, 2%);
- ✓ Com a amostra polida e atacada, e com as devidas identificações, começa então a fase de análise da CAC ao longo da vida do broca. Aqui efetivamente começa a fase de medição e análise comportamental da CAC.
- ✓ A fase de análise da CAC engloba as aquisições das imagens das amostras, ampliadas no microscópio entre 200X e 800X, e a calibração do “software” para a medição. Para cada valor de ampliação das imagens, deve ser realizada uma calibração com o respectivo aumento, o que possibilita a medição da amostra através das imagens obtidas e análise dos resultados.

A calibração do “software” consiste em converter uma medida conhecida pelo software - o número de “pixels” de uma imagem - em uma unidade usual de medidas (milímetros, metros, polegadas, etc...). É realizada da seguinte forma:

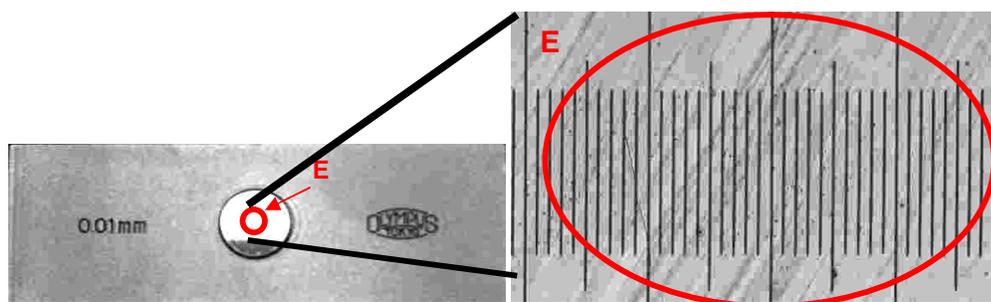


FIGURA 20 – IMAGEM DA MICRO-ESCALA COM DESTAQUE PARA O DETALHE E (ESPELHO).

- ✓ Para a realização da calibração do analisador de imagens, é necessário recorrer a uma escala graduada utilizada na microscopia

ótica para a calibração de oculares e de outros dispositivos; esta escala trata-se de uma micro-escala com extensão de 1mm impressa em espelho, com subdivisões centesimais (0,01mm) (Figura 20);

✓ O processo de calibração inicia-se com a captura das imagens da micro-escala nas posições verticais e horizontais, em todas as ampliações oferecidas pelo microscópio no qual a câmera está acoplada. Tendo estas imagens disponíveis, passa-se então a configurar o módulo de ferramenta para calibração do “software”. Neste módulo de ferramentas é solicitada, ao operador, a determinação de oito pontos conhecidos, que são marcados nas imagens da micro-escala obtidas com o mesmo aumento e em direções diferentes (vertical e horizontal). As determinações dos pontos são feitas nas imagens das micro-escalas abertas seqüencialmente na tela e com a ferramenta de calibração ativada; assim, os pontos determinados em uma imagem se sobrepõem na outra imagem quando aberta (Figura 21).

✓ A determinação destes pontos segue uma lógica cartesiana com coordenadas nos eixos X e Y; assim, para cada ponto determinado nas graduações da micro-escala, o operador fornece as coordenadas que determinam o ponto. Para isso, existe dentro da ferramenta de calibração, por ponto, quatro janelas de medidas, duas para cada eixo; nas duas primeiras janelas estão dadas as medidas de referência do “software”, ou seja, a localização em "pixels" do ponto na tela; nas outras duas janelas o operador marca o valor de medida lido na micro-escala, ou seja, as coordenadas do ponto (Figura 22). Esse procedimento se repete para os oito pontos determinados dentro das duas imagens, e deve ser repetido para todas as imagens com suas respectivas ampliações (Figura 23);

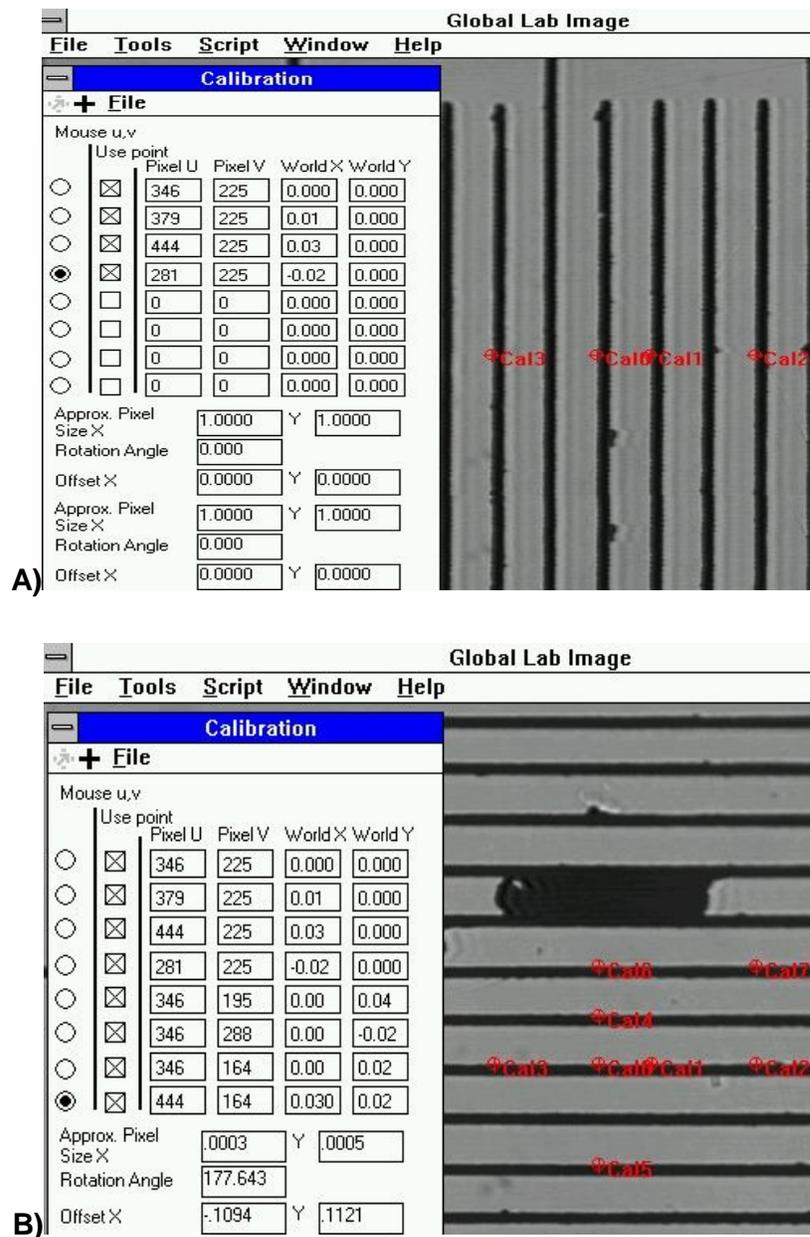


FIGURA 21 – A) IMAGEM DA CALIBRAÇÃO PARCIAL, POSIÇÃO HORIZONTAL. (EIXO X); B) IMAGEM DA CALIBRAÇÃO TOTAL, POSIÇÃO VERTICAL (EIXO Y), COM A SOBREPOSIÇÃO DOS VALORES DO EIXO X.

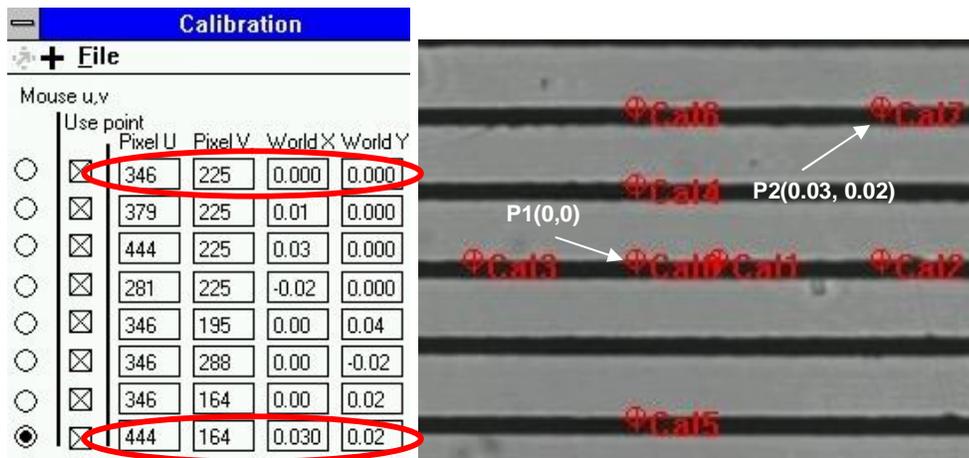


FIGURA 22– IMAGENS DAS JANELAS DE MEDIDA DA FERRAMENTA DE CALIBRAÇÃO, E EM DETALHE O PONTO INICIAL E O PONTO FINAL.

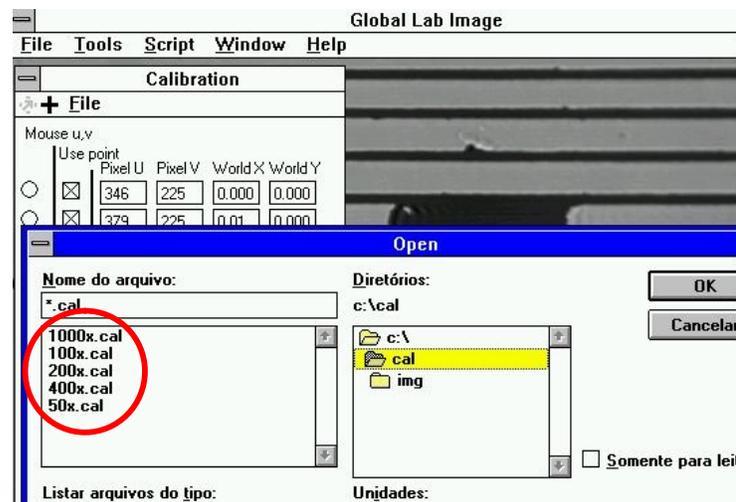


FIGURA 23 – DEMONSTRAÇÃO DOS ARQUIVOS DE CALIBRAÇÃO GERADOS PARA ATENDER AS AMPLIAÇÕES DO MICROSCÓPIO UTILIZADO.

- ✓ Após a determinação destes oito pontos é realizada a compilação dos dados; no módulo de calibração é dado o comando “compute”, que realiza automaticamente as conversões de “pixel” para mm (e vice-versa), quando um arquivo de identificação da calibração realizada (arquivo com extensão “. cal”). Ao acionar qualquer módulo de medição do “software” é indispensável que o arquivo de calibração esteja ativado

na mesma ampliação da imagem para que as medidas possam ser dadas com base nos valores de medidas calibrados. Essas medidas podem ser dadas em diferentes unidades de medida (metros, milímetros, centímetros, polegadas entre outras), de acordo com a graduação da escala utilizada.

É importante salientar que a qualidade das medições está diretamente relacionada à exatidão com que se fez a calibração do “software”. Deve se realizar a calibração em pelo menos duas direções, para que o “software” possa fazer as compensações de ângulo e medidas necessárias. Para a análise do presente trabalho foram realizadas calibrações tanto na horizontal quanto na vertical.

Após a calibração, é possível realizar as medições e as análises das imagens, que foram feitas conforme descrito a seguir:

1. Inicialmente faz-se a aquisição da imagem, numa região de interesse na amostra, a qual será analisada e/ou medida.
2. Medição

Na fase de aquisição da imagem alguns cuidados são necessários, a fim de não comprometer o resultado das medições:

- ✓ A aquisição das imagens deve ser realizada em regiões da amostra que melhor represente as características encontradas em cada amostra. Devem ser captadas também imagens de regiões da amostra que se diferenciam do todo para que seja realizada uma análise mais aprofundada de discontinuidades comportamentais, como surgimento de trincas e manchas. Para uma boa aquisição das imagens os equipamentos, como lentes, lâmpadas e filtros devem estar limpos e isentos de marcas; a superfície da amostra a ser analisada deve estar exatamente paralela em relação à mesa do microscópio, para com isso evitar problemas com a focalização da imagem; ainda é indispensável uma iluminação adequada e bem direcionada à amostra;

- ✓ A imagem captada deve ser salva em arquivos de extensão voltados para imagens, que garantam uma boa resolução e que não comprometam os resultados; não se deve optar por salvar as imagens em arquivos de extensões que impliquem em uma redução do tamanho do arquivo, pois esta redução de tamanho pode vir a comprometer na qualidade da imagem;
- ✓ É aconselhável que as aquisições das imagens sejam realizadas nas mesmas condições de ampliação e luminosidade em que é realizada a calibração.

O processo de medição deve ser realizado dentro dos seguintes parâmetros:

- ✓ Sempre utilizar a calibração correta, para tanto na fase de aquisição da imagem e nomeação do arquivo dessa imagem, deve se explicitar ao máximo a ampliação com que tal imagem foi obtida,
- ✓ Com a questão de ampliação da imagem solucionada deve-se antes de abrir a ferramenta de medição, carregar a ferramenta de calibração com a ampliação equivalente a da imagem.
- ✓ Abrir a ferramenta de medição e organizar os menus das ferramentas na tela, de uma forma que possibilite a máxima visualização da amostra em análise.
- ✓ Tendo em vista o fato de que as medições são geradas através de dois pontos selecionados manualmente na tela do computador, considerando os possíveis erros de posicionamento dos pontos selecionados pelo operador, deve-se repetir o processo de medição mais de uma vez e assim adotar um valor médio entre as medições realizadas.

- ✓ Para a redução desses possíveis erros de posicionamento o operador pode contar com o auxílio da ferramenta de “zoom”, onde é possível focar exatamente a região desejada para medição.

Para visualizar melhor um processo de medição, através de análise de imagem, na Figura 24, pode-se observar um processo de medição direcionado à conferência da calibração realizada: o objeto de medição passa a ser a própria escala utilizada para a calibração obtida com as respectivas ampliações. Ainda nesta Figura pode ser observada a relação existente entre a ferramenta de medição e a ferramenta de calibração ativada, e em detalhe a região medida e o valor obtido.

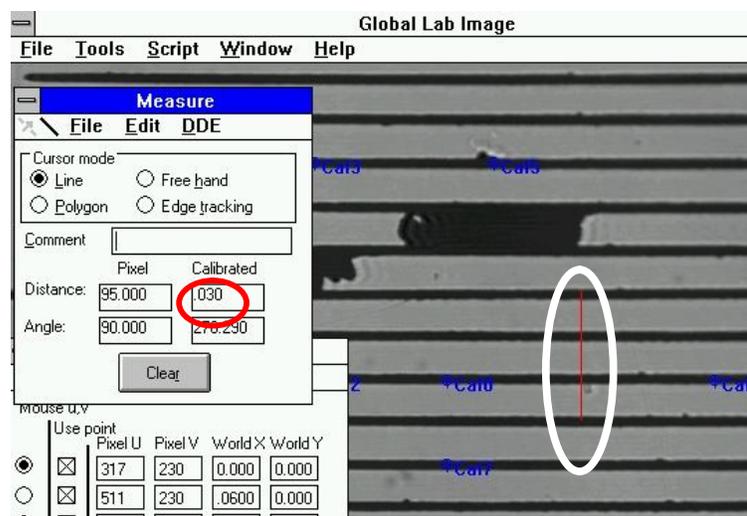


FIGURA 24 – IMAGEM DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO

5.2.3. ANÁLISE DA TENSÃO RESIDUAL

Neste item descreve-se o procedimento de análise dos corpos de prova com o propósito de avaliar o comportamento da tensão superficial da peça ao longo da vida da broca.

A análise foi então realizada em uma empresa da região de Campinas, que disponibilizou uma máquina de medição de tensão por deflação de Raios-X, da marca Digital Fastress “Residual Stress Analyzer” modelo: 1500 SN: 1565-98, fabricada por “Metro Design line USA”.

O procedimento de medição adotado foi o seguinte:

- ✓ Mede-se uma região do corpo de prova que não tenha sido submetida aos efeitos da usinagem, para obtenção de um valor de referência do estado de tensão no qual se encontra o material do corpo de prova antes de ser submetido ao processo de furação;
- ✓ Inicia-se o processo de medição no sentido inverso ao de execução dos furos. Isso é uma prática normalmente aplicada neste tipo de medição. O fato da adoção dessa estratégia de medição se explica com base no tempo consideravelmente grande dispendido para cada medição, pois seguindo o caminho inverso chega-se mais rápido às mudanças bruscas dos valores medidos;
- ✓ Partindo do último furo, a medição se realiza dentro de um intervalo pré-determinado de furos. No caso do presente trabalho, utilizou-se um intervalo de 20 furos (escolha arbitrária) até a estabilização das medidas obtidas, após tal estabilização aumenta-se o intervalo de furos de uma medição para outra;
- ✓ A cada furo medido são verificadas as tensões em três diferentes posições (Figura 25): **A)** superfície da peça próxima ao furo (aproximadamente 0,03mm da parede do furo) como mostra indicação da imagem à esquerda da Figura 24; **B)** posição interna do furo próxima à superfície da peça (aproximadamente 5 mm de profundidade); **C)** posição interna próxima ao final do furo (aproximadamente 27 mm de profundidade) como mostram as indicações da imagem à direita da Figura 25.

- ✓ Essas medições são realizadas para dois conjuntos de furos cuja posição corresponde, aos momentos de fim de seqüência de ensaio, ou seja, quando a broca para de executar furos no corpo de prova principal e realiza um furo no corpo de prova secundário onde é realizada as medições de força de avanço e o momento torçor;

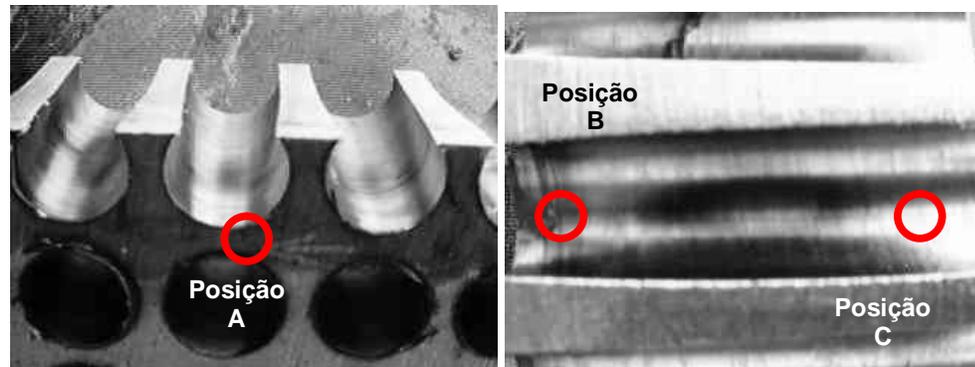


FIGURA 25 - LOCALIZAÇÕES DAS MEDIÇÕES DE TENSÕES SUPERFICIAIS

- ✓ Os dados obtidos devem ser anotados em arquivos Excel para a montagem dos gráficos de interesse para a análise. Recomenda-se a avaliação da evolução da tensão superficial em cada furo medido nas posições de referência.

5.2.4. MICRODUREZA

Para a análise da micro-dureza contamos com o apoio de um laboratório especializado na área (LABMAT - Análise e Ensaio de Materiais), situado na cidade de Piracicaba. Essas análises foram assessoradas pelos técnicos deste laboratório e acompanhada de perto pelo aluno responsável pelo trabalho.

O equipamento utilizado para tal análise foi um micro-duromêtro da marca MICROMET, modelo 2103, Figura 26, o qual foi aferido segundo o procedimento de aferição da MD 036/01. Essa aferição está melhor detalhada no item 5.3, deste trabalho.

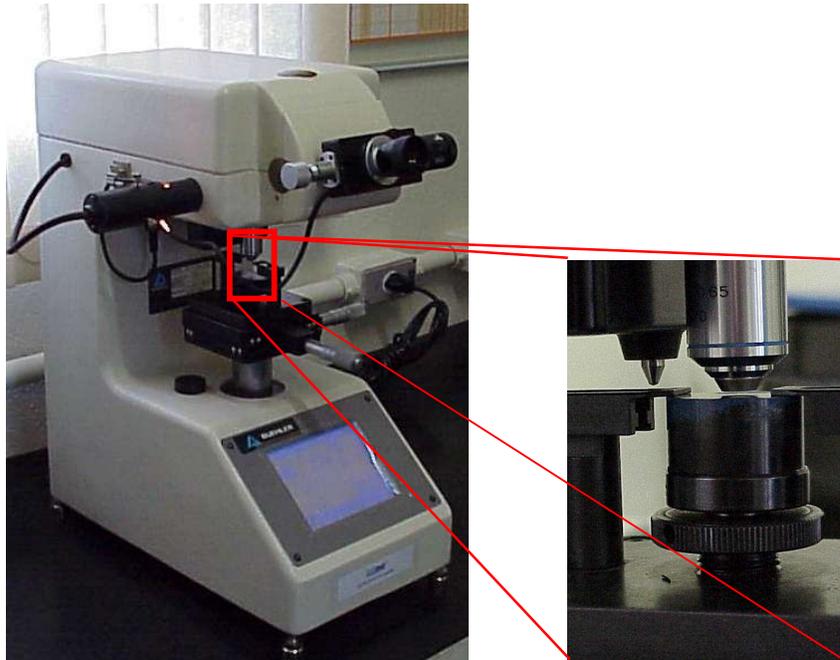


FIGURA 26 – MICRO-DUROMÊTRO UTILIZADO

Um dos maiores cuidados a serem tomados para realização de uma boa análise de microdureza inicia-se na preparação do corpo de prova que deve ser realizado metalograficamente. É indicado um polimento eletrolítico para evitar o encruamento do material na superfície a ser analisada o que afetaria o resultado; caso seja feito um polimento mecânico deve-se remover apenas alguns *mícrons* da camada superficial. Para corpos de provas de pequenas dimensões, este deve ser embutido em baquelite a fim de fixá-lo firmemente e de tornar a sua superfície perpendicular ao penetrador.

O procedimento para a realização dos ensaios de microdureza é descrito pela norma ASTM E384-99:

- ✓ Ligar a iluminação e o equipamento;
- ✓ Selecionar o penetrador desejado, esse penetrador deve estar limpo e livre de cargas estáticas;

- ✓ Prender o corpo de prova no aparelho (amostra analisada), mantendo suas superfícies perpendicular ao eixo de trabalho do penetrador, Figura 26;
- ✓ Acertar o foco do microscópio utilizando a menor ampliação possível da imagem;
- ✓ Ajustar a intensidade da luz e a abertura dos filtros para se obter melhor resolução, brilho e contraste da imagem;
- ✓ Selecionar área para a medição para a determinação da dureza, antes de iniciar a aplicação da carga aumentar a ampliação da imagem e acertar o foco;
- ✓ Posicionar o penetrador e selecionar a carga desejada;
- ✓ Aplicar a pré-carga e a carga pelo tempo indicado na norma ASTM E 384 – 99;
- ✓ Após a desativação da carga, mudar o aparelho para o modo de medição e selecionar as lentes adequadas. Focalizar a imagem, ajustar a intensidade de luz para se obter a máxima resolução e contraste;
- ✓ Examinar a impressão para verificar se os quatro cantos estão bem focados e se existe simetria nas diagonais. Caso essas condições não estiverem dentro do esperado, o teste deve ser realizado novamente em outra região do corpo de prova;
- ✓ Após obtenção de uma boa impressão, medir as diagonais obtendo o valor médio;
- ✓ Calcular o valor da micro dureza utilizando a equação 1;
- ✓ Tomar nota do valor e repetir quantas vezes forem necessárias;
- ✓ É importante salientar a existência de equipamentos mais modernos hoje no mercado, que possuem sistemas mais avançados os quais permitem uma leitura de dureza que dispensa o uso das formulas, cabendo ao operador

apenas posicionar uma espécie de mira nas extremidades das duas diagonais que o próprio aparelho já calcula a média das diagonais e simultaneamente expõe o valor da medida da dureza analisada.

Utilizando-se de cargas muito baixas (menores que 0,3 Kgf), pode haver uma pequena recuperação elástica do material. Também podem produzir impressões muito pequenas que dificultam a medição das diagonais (L), devido à dificuldade de identificar os cantos das impressões. Esses fatores podem provocar erros no ensaio, resultando valores de dureza menores que o verdadeiro (TARASOV, apud SOUZA, 1982).

A calibração da máquina deve ser freqüente, principalmente porque o erro na aplicação da carga altera em muito o valor da microdureza, mesmo com variações de 0,001Kgf para cargas menores que 0,050 Kgf. O penetrador deve ter sua ponta bem definida; caso contrario poderão ocorrer erros graves na leitura da dureza (LYSIGHT, apud SOUZA, 1982).

É importante lembrar o fato de que geralmente mais de uma impressão é realizada por ensaio na mesma amostra, e deve-se atentar para as distâncias entre as impressões que devem ser em média 3 vezes o valor de comprimento da diagonal.

5.3. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste item são apresentados brevemente os dados característicos das máquinas e equipamentos utilizados no presente trabalho:

- √ Para a análise das tensões residuais foi utilizado um equipamento de difração de Raios-X, da marca Digital Fastress “Residual Stress Analyzer”, modelo: 1500 SN: 1565-98, fabricada por “Metro Design line USA”, com incerteza de medição de +/- 5 KPSI, segundo Certificado de Calibração emitido no ano de 2000. Ver Anexo I.

- √ Para as medições de microdureza foi utilizado um microdurômetro da marca MICROMET, modelo 2103, o qual foi aferido, em maio de 2002, segundo o procedimento de aferição da MD 036/01, com incerteza de medição +/- 1HV. Ver Anexo II.
- √ Para a aquisição de imagens foi utilizado um microscópio metalográfico da marca NIKON, modelo Microflex HFM, Photomicrographic Attachments, revisado e aferido em 18/02/2000. A ele foi acoplada uma câmera CCD Hitachi monocromática, ligada a um microcomputador com o "software Global Lab Image View".
- √ Para as medições dos desvios de dimensão e de posição foi utilizada uma Máquina de Medir Por Coordenadas, da Marca Starrett, modelo DCC - RGDC2828-24, em milímetros, com precisão linear em X, Y e Z de 0,0051 mm e repetibilidade linear de 0,0015 mm, segundo catálogo do fabricante, Anexo III.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises desenvolvidas. Estes resultados têm como base de obtenção os procedimentos descritos no capítulo anterior. As análises e discussões serão divididas em itens, sendo que cada um deles trata dos resultados individualmente.

6.1. DESVIOS DE FORMA E DIMENSIONAIS

A base de análise desses desvios se concentrou no estudo de dados obtidos em medições realizadas numa MMC, referida no Capítulo 5 deste trabalho. Esses dados foram compilados em planilhas eletrônicas ("Microsoft Excel") e por meio de tratamento de dados e acompanhamento dos valores medidos foi possível chegar a alguns resultados que permitiram uma avaliação do comportamento dos furos obtidos no corpo de prova ao longo da vida da broca.

Com estes resultados foram gerados planilhas e gráficos com o objetivo de melhor expor os resultados obtidos, os quais podem ser observados nesta seção do trabalho.

Os gráficos das Figuras 27 a 29 apresentam os resultados relativos aos **desvios dimensionais (diâmetro)**. Na Figura 27 é observado o gráfico dos valores do diâmetro medidos nos furos no corpo de prova ao longo da vida da broca; no gráfico da Figura 28 mostra-se o comportamento da variação do diâmetro desses furos usinados ao longo da vida da broca, tendo por valor de referência para o eixo das abscissas o valor nominal do diâmetro do furo (no caso, 10 mm). A Figura 29 mostra o comportamento da variação em valores absolutos em relação ao diâmetro nominal.

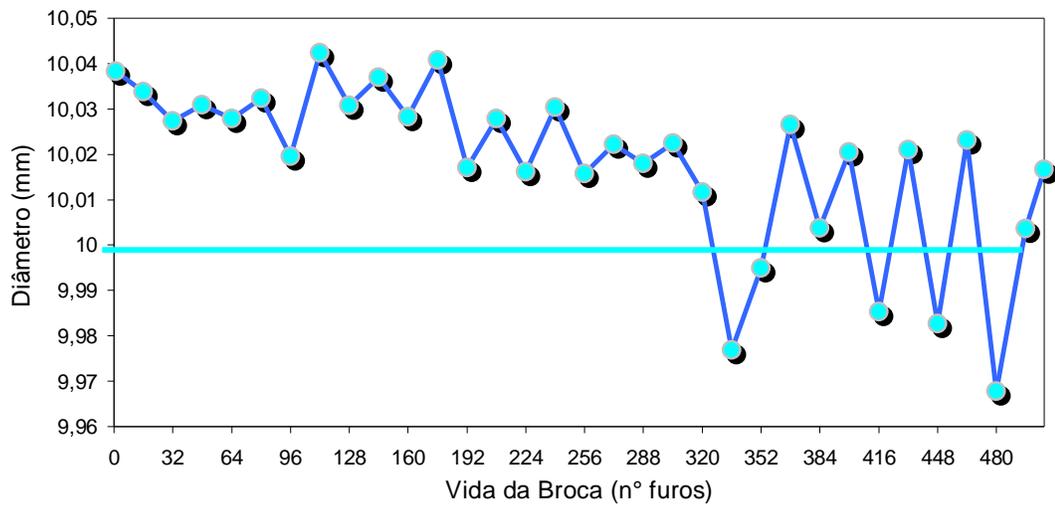


FIGURA 27 – VALORES DE DIÂMETRO OBTIDOS NA MEDIÇÃO

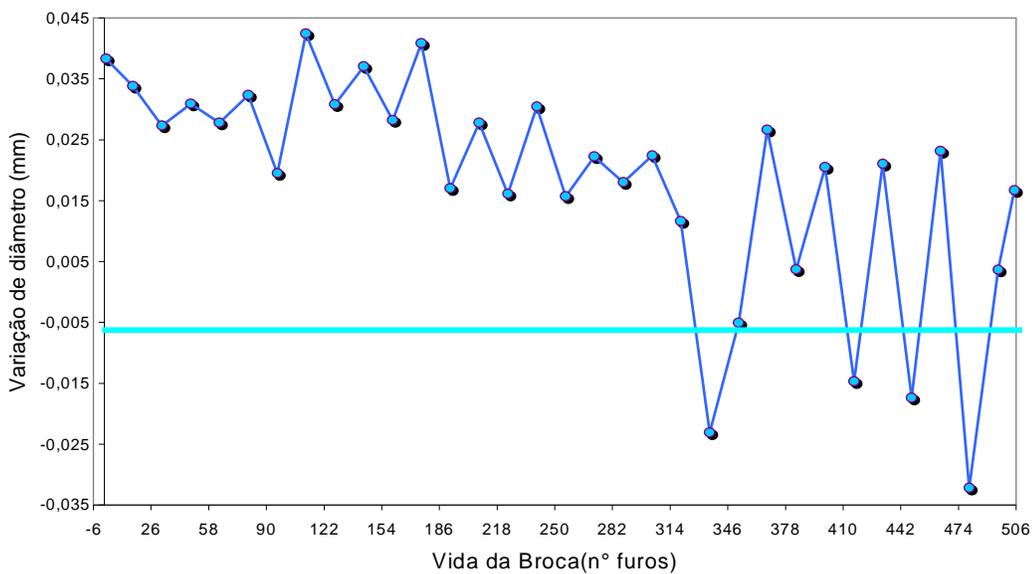


FIGURA 28 - COMPORTAMENTO DO DIÂMETRO DOS FUROS AO LONGO DA VIDA DA BROCA EM RELAÇÃO AO VALOR NOMINAL.

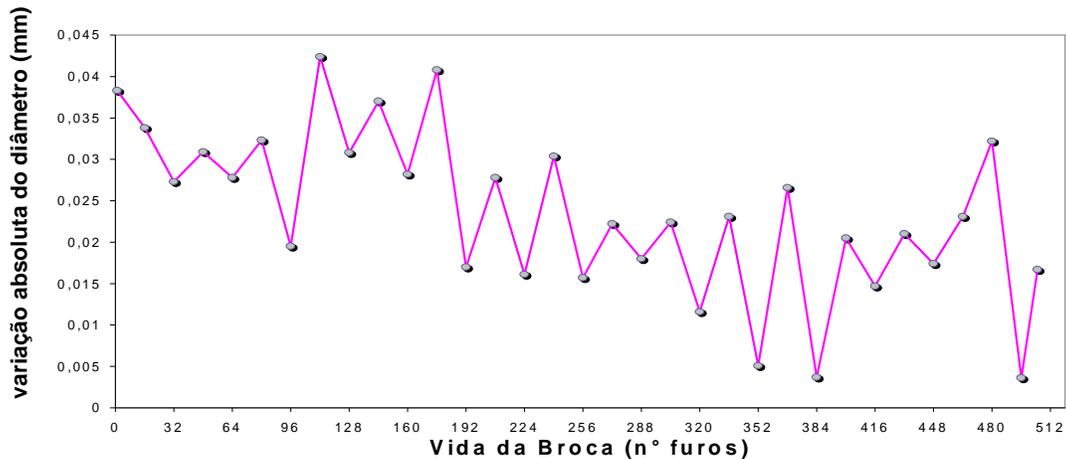


FIGURA 29 - VARIAÇÃO ABSOLUTA DO DIÂMETRO DOS FUROS EM RELAÇÃO AO VALOR NOMINAL MEDIDA AO LONGO DA VIDA DA BROCA.

No gráfico da Figura 27, nota-se que os valores de diâmetro apresentam pequena dispersão até aproximadamente o furo 300, estando todos os valores acima do diâmetro nominal. Após isso, a dispersão aumenta e surgem furos com diâmetro até mesmo menores que o nominal, permanecendo com este comportamento até o final da vida da broca. Esse comportamento pode estar associado à evolução do desgaste da broca, que altera a forma da solicitação das arestas de corte no momento da execução do furo.

Nota-se nos gráficos das Figuras 28 e 29 que ao longo da vida da broca existe uma tendência de aproximação entre o diâmetro medido e o valor nominal dos furos, o que pode ser creditado ao desgaste da aresta principal de corte e à atuação mais efetiva da aresta secundária, que tem diâmetro menor que a aresta principal. Apesar de resultar em valores mais interessantes do ponto de vista dimensional, essa redução deve ser analisada sob os aspectos econômico e operacional. Com relação à questão operacional, se a execução desse furo for uma etapa que precede a uma outra operação de usinagem, como por exemplo, rosqueamento por macho, isso representaria uma oscilação indesejável por afetar diretamente as condições de solicitação sofridas pelas

ferramentas durante o processo, podendo ocasionar na sua quebra e na perda da peça ou em acréscimo no tempo para recuperação da mesma.

O desgaste excessivo da aresta principal também não é interessante do ponto de vista de reaproveitamento da broca, pois compromete as camadas de recobrimento e impede a reafiação. Também é alterada a composição do substrato de metal duro, pois é possível que algum dos elementos possam sofrer difusão em função do contato direto com a peça que passa a existir. Numa análise química feita em uma das brocas utilizadas nos ensaios, observou-se que a proporção do teor dos elementos do substrato foi alterada, como mostra a Tabela 2.

TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DOS ELEMENTOS ENCONTRADOS NA ANÁLISE QUÍMICA DA BROCA NOVA (%INICIAL) E AO FINAL DA VIDA (%FINAL)

Elemento do substrato	% inicial	% final
Ti	0,04469	0,05434
Co	0,17538	0,47715
W	0,77993	0,40770
Fe	Não encontrado	0,06081

As alterações mais significativas são a redução do percentual de W e o aumento do percentual de Co, além, do surgimento de residuais de Fe, provavelmente originados de impregnações do material usinado (Anexo IV). Dessa forma, a broca não pode ser reaproveitada ao final da vida, devendo ser descartada. Por ser uma ferramenta de custo relativamente elevado, devido às suas características construtivas e de composição, esse descarte é economicamente indesejável.

Com relação ao **perpendicularismo** dos furos, a Figura 30 mostra o comportamento observado ao longo da vida da broca. Nota-se que no início da vida os valores obtidos têm pouca dispersão de variação. Apenas após o 100º furo a dispersão começa a crescer, aumentando significativamente após a faixa dos 300 furos. Em valores absolutos, conforme mostrado no gráfico da Figura 31, esse aumento na dispersão dos desvios fica mais evidente. É interessante notar que esse comportamento ocorre praticamente no mesmo instante em que ocorre a redução do diâmetro.

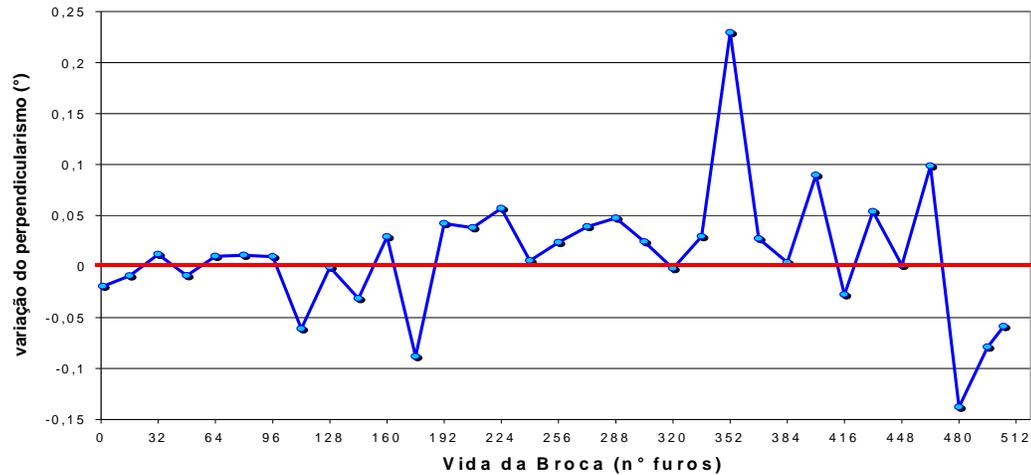


FIGURA 30 – VARIAÇÃO DO PERPENDICULARISMO DOS FUROS AO LONGO DA VIDA DA BROCA.

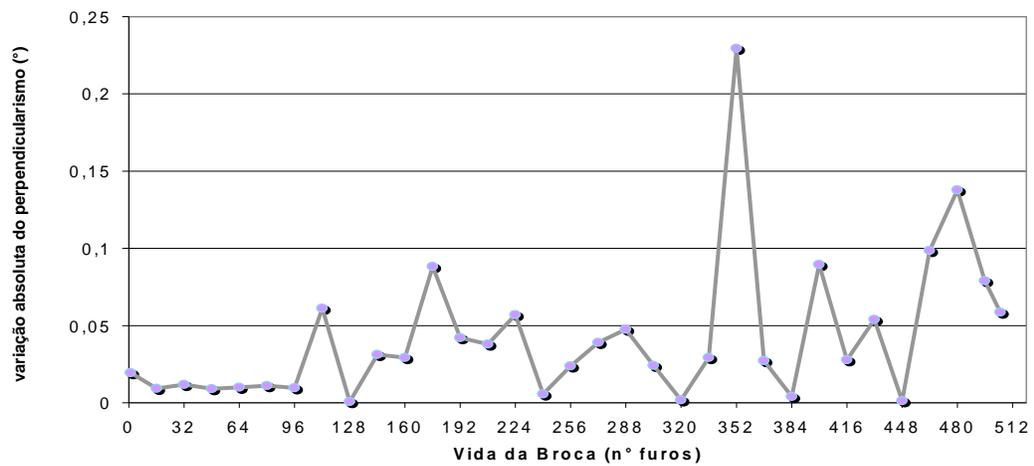


FIGURA 31 – VARIÇÃO ABSOLUTA DO PERPENDICULARISMO DOS FUROS AO LONGO DA VIDA DA BROCA.

Da mesma forma que no caso do diâmetro, pode-se associar a estes comportamentos de aumento da dispersão de variação do perpendicularismo o desgaste excessivo das arestas principais de corte da broca; também é provável que o desvio ocorra devido ao desgaste assimétrico das arestas principais da broca, conforme mostra a Figura 32.

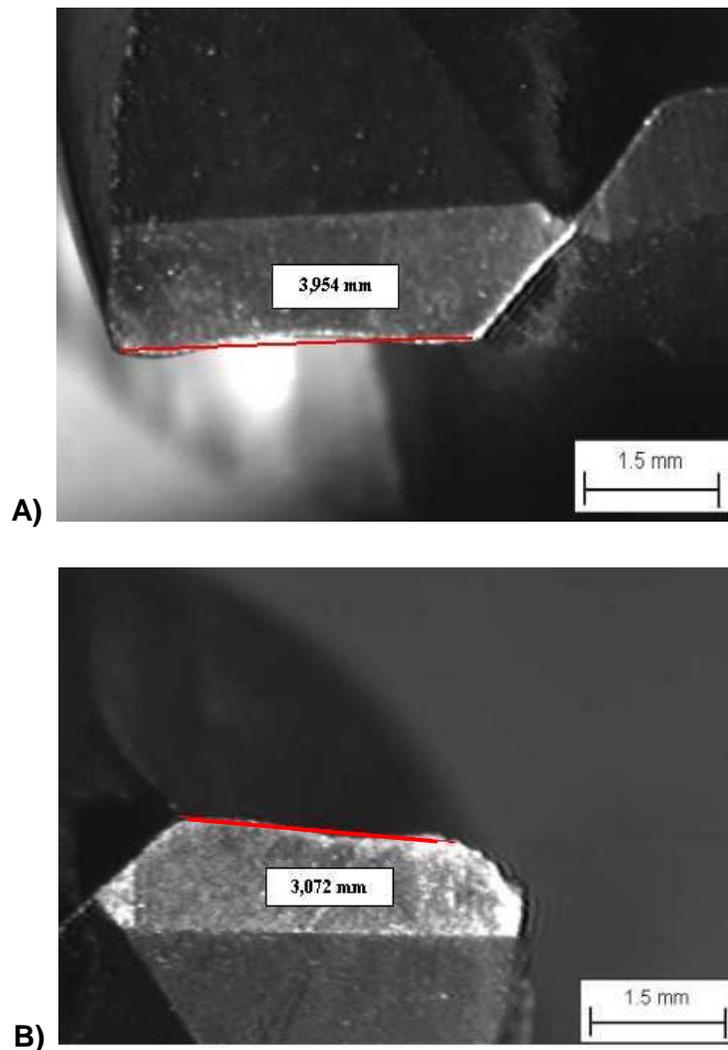


FIGURA 32 - FIGURAS DAS ARESTAS PRICIPAIS DE CORTE MEDIDAS

Esse desgaste desigual, identificado na Figura 32, provocando esforços diferentes em cada lado da broca e, por conseqüência, momentos diferentes em cada lado, resulta em um momento torçor desalinhado em relação ao centro da broca e induz o desvio na direção de orientação do furo.

O desequilíbrio nos esforços de corte também pode ser uma das causas pelas quais houve a ocorrência de quebras nas brocas em alguns ensaios. O desgaste em uma das arestas principais foi relativamente maior que na outra, provocando uma torção no corpo da broca.

Com relação às análises dos **desvios de localização dos furos** ao longo da superfície do corpo de prova, foram levantados dados referentes ao posicionamento individual dos furos tanto na direção longitudinal (coordenada X), como na direção transversal (coordenada Y). Esses dados estão traduzidos no modo incremental e estão apresentados no gráfico da Figura 33.

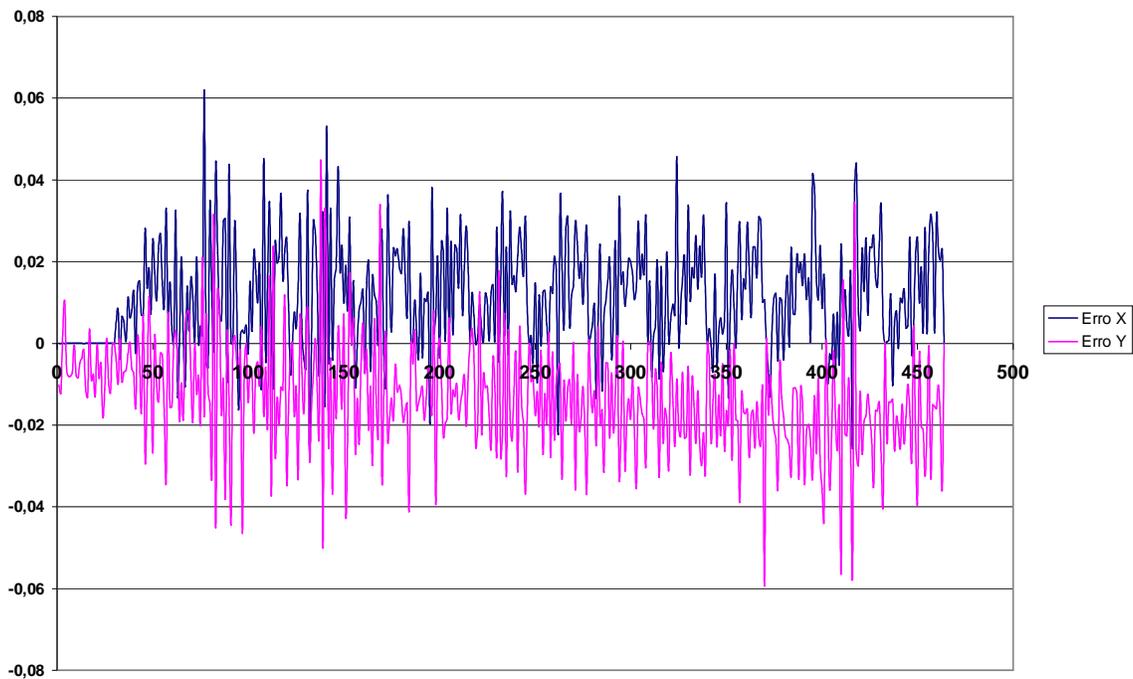


FIGURA 33 – VARIAÇÃO DE LOCALIZAÇÃO DOS FURO NOS EIXOS X E Y

Tendo em vista a quantidade elevada de amostras representadas no gráfico da Figura 33, torna-se difícil a interpretação dos dados expostos. Ainda assim podem ser notadas as tendências de desvio tanto no eixo X, como no eixo Y, à medida em que o processo de furação caminha em direção ao fim de vida da broca.

Para facilitar a visualização e a interpretação dos dados foi feito um mapeamento das posições medidas e nominais dos furos. A Figura 34 mostra

esse mapeamento, através do qual ficam mais evidentes os desvios dos eixos X e Y encontrados nos furos.

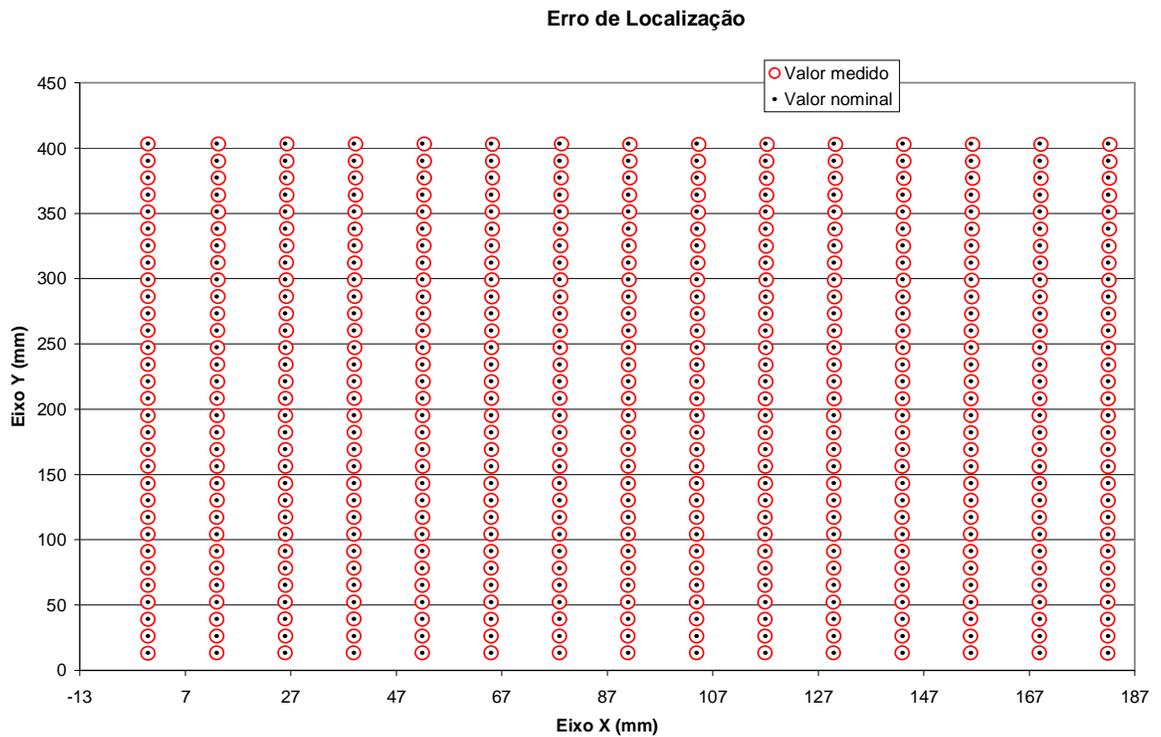


FIGURA 34 – VARIAÇÃO DE DESLOCAMENTO DOS EIXOS X E Y

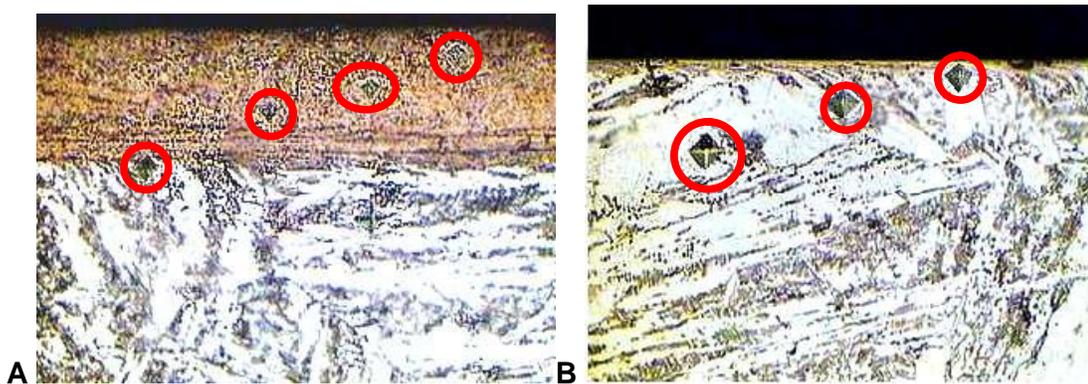
É importante salientar que para uma análise mais aprofundada destes erros de localização é aconselhável considerar tanto o erro de repetibilidade de posicionamento da máquina-ferramenta que realizou a furação, como o erro de posicionamento da MMC que realizou a medição. Mesmo assim, é possível afirmar que ao longo da vida existe uma tendência de aumento da ocorrência desse tipo de desvio que pode ser creditada ao desgaste assimétrico das arestas de corte.

6.2. MICRODUREZA

A microdureza Vickers foi realizada seguindo instruções da norma ASTM E384-99. Alguns dos passos dados pelo procedimento da norma, não necessitaram ser seguidos, tendo em vista as características modernas do equipamento utilizado no que diz respeito à leitura dos valores da microdureza.

Para realização desta análise foi aplicado um misto de medição normal de microdureza com uma análise de gradiente. Dessa forma a análise foi realizada em uma amostragem de 16 furos aleatórias em estágios diferentes do ensaios, seguindo a lógica da análise de gradiente: foram feitas medições de microdureza em diferentes posições e em regiões próximas da superfície das amostras analisadas. Não foi realizada, de fato, uma análise de gradiente de calor, pois as distâncias adotadas entre uma impressão e outra não foram controladas como pede a norma que rege este tipo de análise, mesmo porque fugiria um pouco do foco principal do trabalho.

A carga utilizada para medição das amostras analisadas foi de 0,025 Kg, escolhida conforme os procedimentos da norma ASTM E384-99. Segundo as determinações dessa norma, a distância entre impressões deve ser aproximadamente três vezes a dimensão da diagonal média. Para tanto, foi necessário adotar uma inclinação na linha de medição com o propósito de se conseguir concentrar o máximo de medições a pequenas distâncias da superfície da amostra. Para melhor entender esse processo, foram realizadas duas imagens de amostras que passaram pela análise de microdureza, em diferentes estágios de desgaste da broca (furo 416 e 160), as quais podem ser vistas na Figura 35.



*FIGURA 35 – DISPOSIÇÃO DAS IMPRESSÕES DE MICRODUREZA **A)** AMOSTRA 416
B) AMOSTRA 160*

Nas imagens da Figura 35 é possível visualizar como ficaram dispostas as impressões. Também é possível notar a diferença de tamanho das impressões; onde quanto mais próximo da superfície, menor o tamanho da impressão, e conseqüentemente, menor a dimensão das diagonais e maior valor de microdureza encontrado, que para uma carga constante o tamanho da impressão obtida é inversamente proporcional à magnitude da microdureza encontrada.

Com os resultados dessa análise foram gerados gráficos e planilhas em Excel para auxiliarem no estudo do comportamento das microdurezas encontradas no corpo de prova ao longo do ensaio. Parte destes gráficos estão inseridos nesse item do trabalho com o propósito de melhor exemplificar os fenômenos identificados nas estruturas das amostras analisadas. É importante salientar que para dar início às análises foram realizadas algumas medições nas amostras em regiões afastadas a superfície e livres de alterações estruturais aparentes, para levantar a microdureza média do material analisado, com a qual se definiu o valor de referência (310 HV) para efeitos comparativos e comprobatórios de mudanças de comportamento.

O gráfico da Figura 36 foi gerado com os valores das maiores durezas encontradas nas amostras. As impressões que deram origem a estas medidas de microdurezas se concentraram, de uma maneira geral, numa faixa dentro da

amostra a qual não excedeu a casa dos 0,02mm de distância da superfície das amostras analisadas.

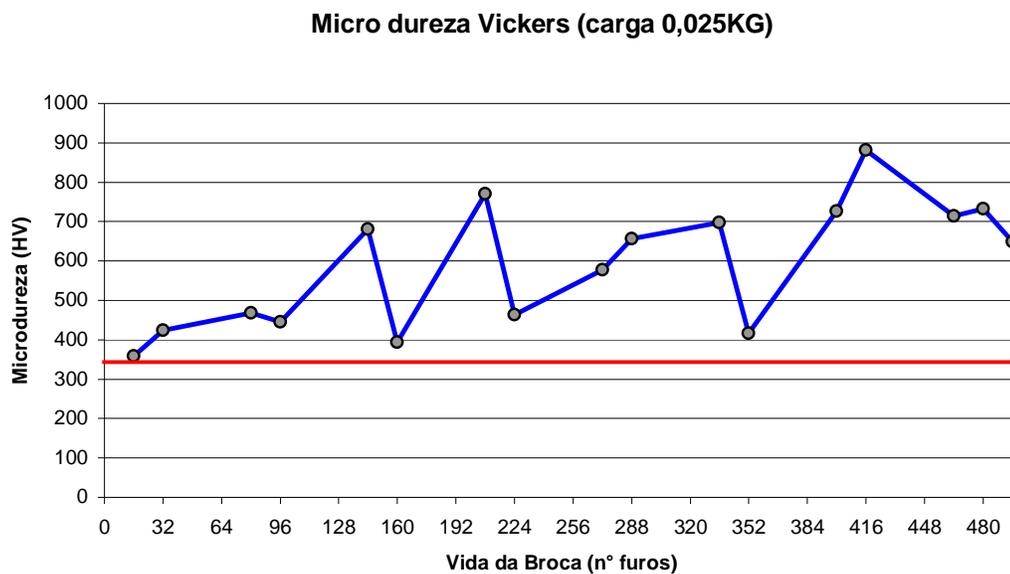


FIGURA 36 – COMPORTAMENTO DA MICRODUREZA EM RELAÇÃO AO FIM DE VIDA DA BROCA.

Observa-se que existe uma tendência de crescimento da microdureza ao longo da vida da broca, reforçando a tese de que as paredes do furo sofrem algum tipo de influência térmica e/ou mecânica devido ao desgaste das arestas principais de corte.

Essa tese se confirma ao analisar-se os gráficos das Figuras (37 e 38), que mostram o comportamento da microdureza ao longo da superfície e subsuperfície das amostras. A variação da microdureza nas regiões analisadas, indica a existência de alteração das características mecânicas do material nas camadas superficial e subsuperficial das amostras, proveniente de solicitações ocorridas durante o processo de execução dos furos. Esta análise foi realizada para todas as amostras submetidas à medição de microdureza, o que totalizou um conjunto de 16 análises sendo que para cada uma delas foram realizadas

em média de 5 medições. As Figuras 37 e 38, fazem parte desse conjunto de análise e são referentes às amostras dos furos de número 16 e 480 respectivamente, como indicado nas Figuras. O restante dos gráficos referentes a esta análise segue no Anexo V.

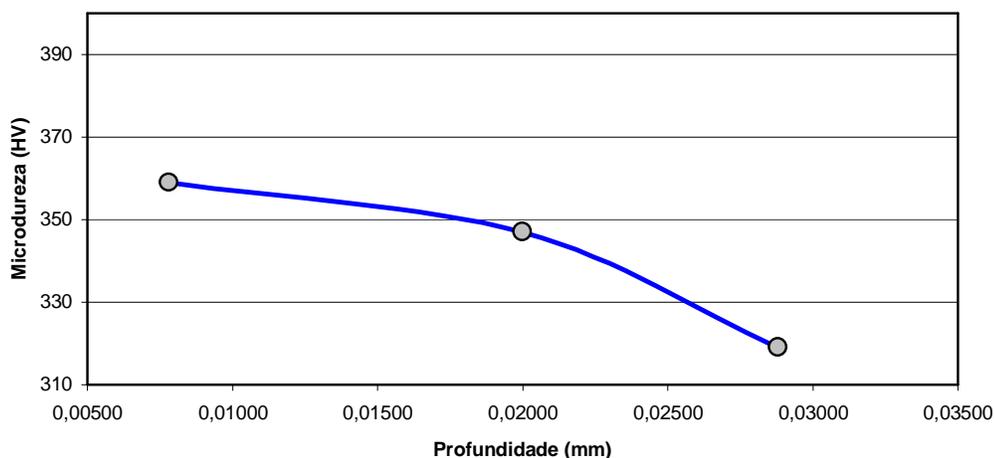


FIGURA 37 – ANÁLISE DE MICRODUREZA DA AMOSTA 16

Assim como na Figura 37, o gráfico da Figura 38 também oferece dados que consolidam a hipótese de ocorrência do surgimento de uma camada que apresenta seqüelas possivelmente advindas de uma solicitação gerada no processo de obtenção do furo. O que difere nestas amostras é a proporção de variação do comportamento de microdureza e a propagação da camada em direção ao núcleo da peça. Estas características mostram-se mais acentuadas no gráfico da Figura 38, o qual corresponde à análise da superfície e subsuperfície da amostra referente ao furo de número 480. Uma situação de desgaste da broca próxima ao fim de vida, diferente da situação encontrada na análise da Figura 37, situação de início de vida da broca.

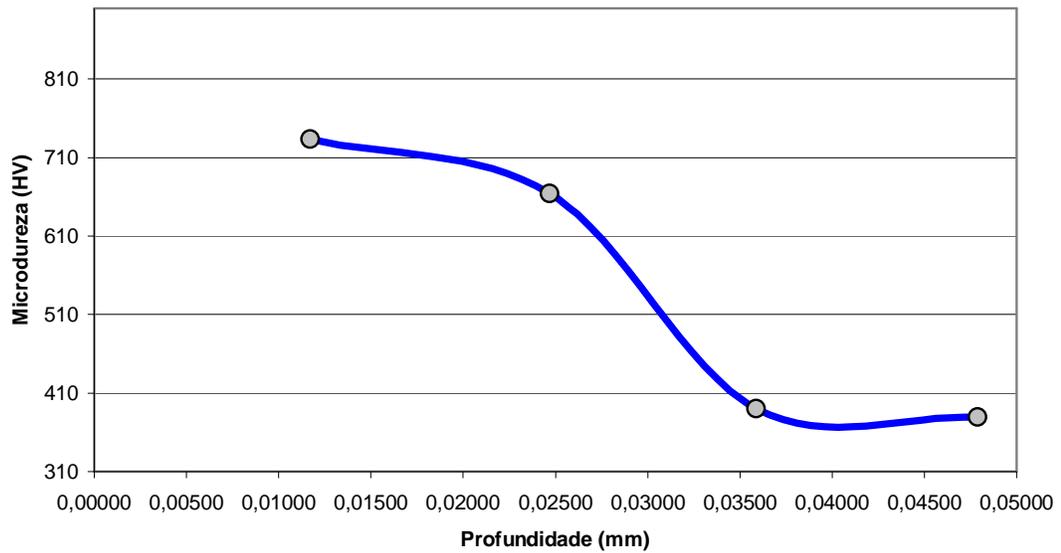


FIGURA 38 – ANÁLISE DE MICRODUREZA DA AMOSTRA 480

Seguindo a mesma linha de proposta da comprovação da existência da camada afetada pelo processo de furação um bom indicativo, a ocorrência de alterações nas propriedades mecânicas segue na Figura 39: o gráfico apresenta o comportamento geral das amostras analisadas no que diz respeito à profundidade em que se dá a estabilização dos valores medidos das microdurezas, região onde se atinge o valor de referência (310 HV).

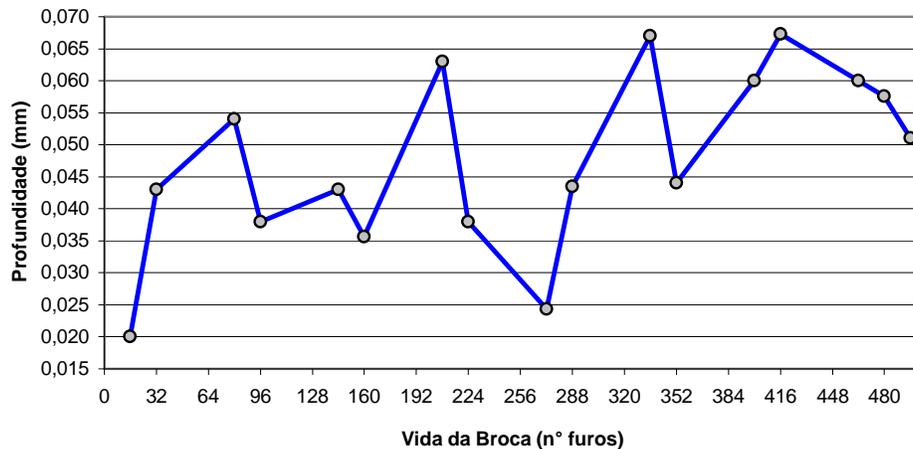


FIGURA 39 – POSIÇÕES DE ESTABILIZAÇÃO DA MICRODUREZA

É possível fazer uma projeção do aumento da profundidade da camada afetada a partir da localização da estabilização do comportamento de microdureza, que passa a ser mais afastada da superfície da amostra à medida em que o processo caminha em direção ao fim de vida da broca.

Com análise das microdurezas realizadas e representadas neste item, tem-se um indicativo forte de que de fato há a ocorrência de uma camada afetada, supostamente pelo calor na superfícies e subsuperfície das amostras analisadas. Tal ocorrência de camada pode vir a colaborar com o comprometimento da integridade superficial das amostras.

6.3. ANÁLISE DE FORMAÇÃO DA CAMADA AFETADA PELO CALOR (CAC)

No que se refere à integridade da camada superficial e subsuperficial das amostras, foram feitas avaliações do surgimento de CAC através da análise de imagens, conforme descrito no Capítulo 5.

Como resultado desta análise de imagens são apresentados gráficos nos quais se observa o comportamento assumido pelas dimensões das CAC ocorridas

nas amostras ao longo do ensaio. Estes gráficos auxiliam na interpretação do comportamento da formação da CAC em função da vida da broca. Junto a estes gráficos são apresentadas algumas imagens das amostras analisadas com o objetivo de demonstrar não só de maneira numérica, mas também visual do fenômeno ocorrido na estrutura do material das amostras submetidas ao ensaio de furação.

Assim como na análise desenvolvida no item 6.2, na análise deste item também foi detectada a formação de uma camada afetada a qual repete o mesmo comportamento identificado nas análises do referido item.

Como marco inicial desta análise foi preparada uma amostra do material do corpo de prova, retirada de uma região afastada das regiões envolvidas no ensaio. Sua microestrutura foi adquirida em forma de imagem com o propósito de servir como parâmetro de comparação visual entre microestrutura não afetada e microestrutura afetada, como mostram as imagens das Figuras 40 e 41, respectivamente.

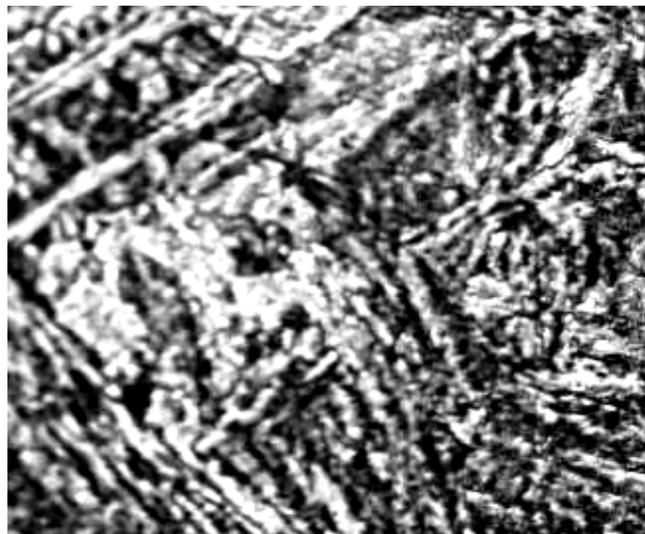


FIGURA 40 – AMOSTRA DE MICROESTRUTURA NÃO AFETADA

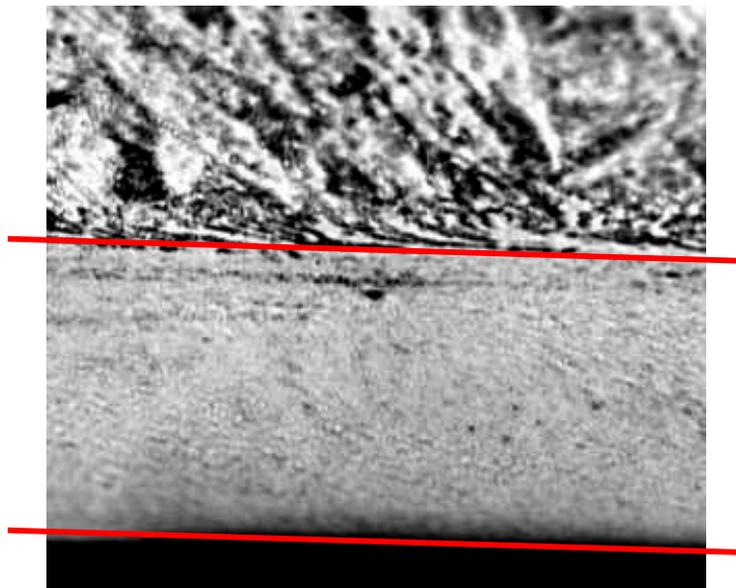


FIGURA 41 – AMOSTRA DE MICROESTRUTURA AFETADA

Na Figura 41 pode ser vista uma imagem de CAC, a qual se apresenta como uma microestrutura mais densa e com tonalidades mais claras que a microestrutura apresentada na Figura 40 e no restante da microestrutura apresentada na própria Figura 41, região acima da região delimitada pelas linhas (SHAW, 1994; VIEIRA, 1999).

Esse primeiro contato com a imagem de uma microestrutura afetada, comprovou a real existência da CAC, o que veio a consolidar e justificar a necessidade da realização de uma análise de imagem. Os valores obtidos com esta análise são apresentados a seguir, começando pela exposição da Tabela 3, que mostra os valores de profundidade da CAC obtidos nas análises. As amostras foram selecionadas de acordo com a estratégia de medição já adotada anteriormente (16 em 16 furos).

A seguir é apresentada uma tabela, a qual está relacionada às amostras dos furos analisados, com suas respectivas medidas de CAC. As amostras foram selecionadas segundo a estratégia utilizada para obtenção dos furos (16 em 16 furos), com relação aos valores demonstrados na Tabela 3. Podem ser notados indícios de um comportamento similar ao constatado na análise do item

anterior, em que ocorre uma projeção dos valores em função do desgaste da broca (fim da vida).

TABELA 3 – TABELA DOS VALORES DAS MEDIÇÕES DA CAC

Furo (n°)	CAC (mm)	Furo (n°)	CAC (mm)
16	0,01	272	0,034
32	0,015	288	0,031
48	0,014	304	0,044
64	0,021	320	0,029
80	0,026	336	0,064
96	0,032	352	0,042
112	0,023	368	0,038
128	0,042	384	0,039
144	0,031	400	0,067
160	0,036	416	0,038
176	0,047	432	0,046
192	0,041	448	0,038
208	0,057	464	0,068
224	0,022	480	0,049
240	0,023	496	0,051

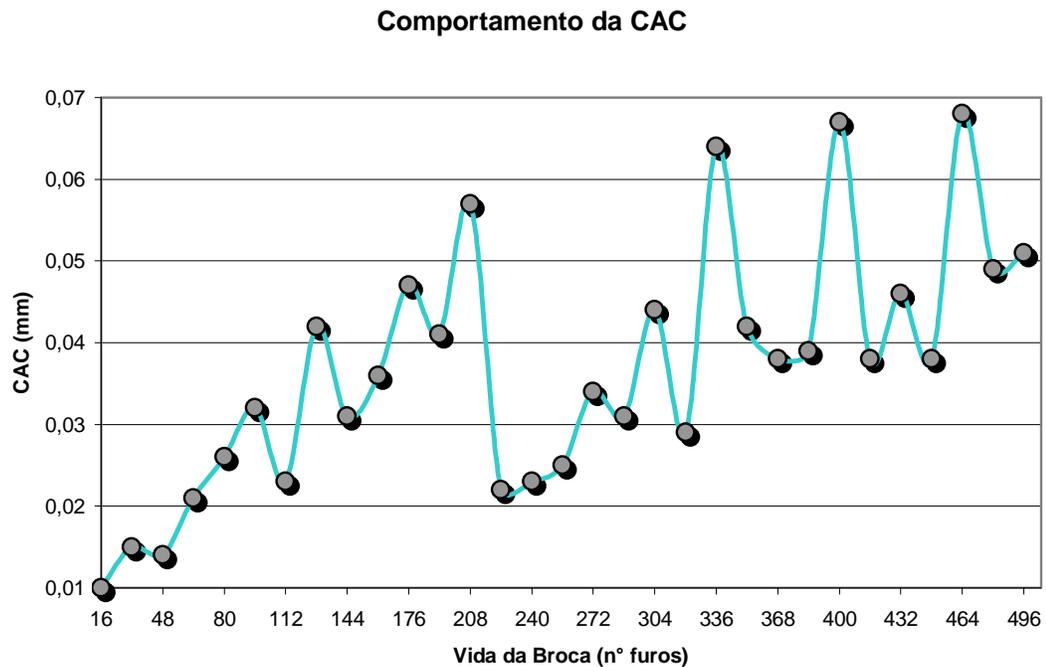


FIGURA 42 – COMPORTAMENTO DA CAC AO LONGO DO ENSAIO

No gráfico da Figura 42 nota-se que houve uma queda significativa no valor da CAC por volta do furo 208. Essa queda pode ser resultado de uma parada no ensaio de furação que possibilitou o resfriamento da broca e do corpo de prova. Ao se retornar o ensaio, a CAC volta a se formar e apresentar tendência de crescimento.

As CAC encontradas e analisadas possuem profundidades que variam da ordem de 0,01 mm já no início do ensaio (furo 16), até terminar o ensaio com a profundidade de 0,051 mm, último furo analisado no corpo de prova (furo 496). Alguns valores chegam a ser maiores que o identificado no último furo, tendo como a máxima medida de profundidade analisada a CAC referente à amostra do furo 464 que atingiu o valor de 0,068 mm.

No decorrer dessa análise, foram adquiridas imagens de todas as amostras das quais algumas são apresentadas a seguir. Essas imagens mostram o valor

da profundidade da CAC, medido em mm; registrado nas próprias imagens, como facilitador para o leitor interpretar os resultados. Essas imagens podem ser observadas nas Figuras de 43 à 48.

As demais imagens estão apresentadas no Anexo VI. Vale ressaltar que para a medição da CAC assumiu-se a região na qual os grãos da microestrutura do material sofrem uma deformação e apresentam-se com orientação no sentido no qual ocorreu o corte. Essa deformação é bem visível nas Figuras 45, 46 e 47.

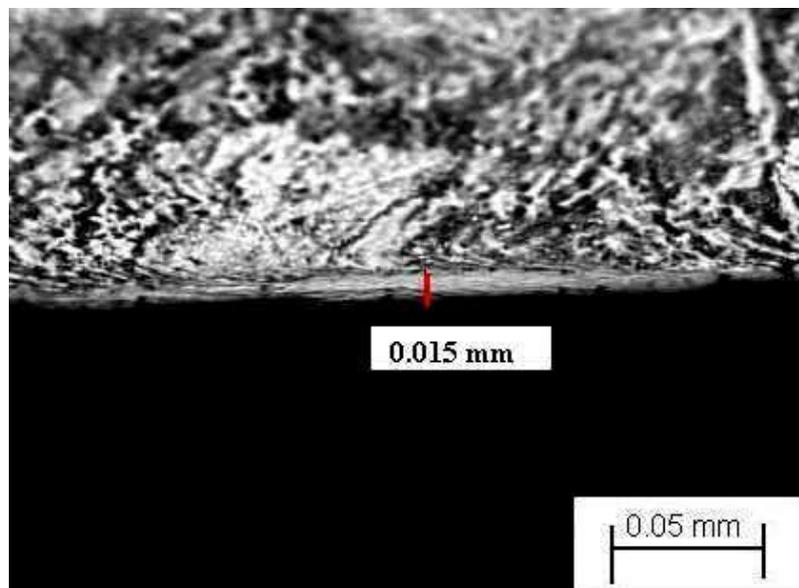


FIGURA 43 – CAC DO FURO 16

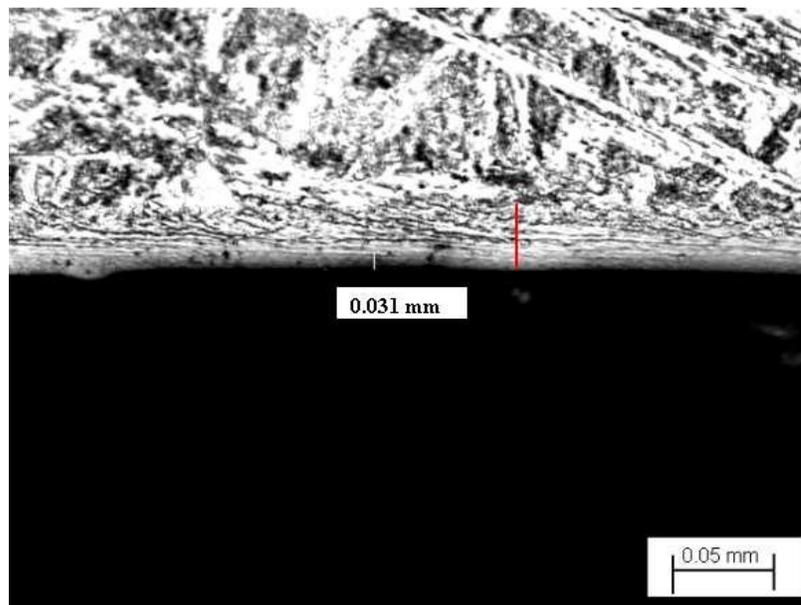


FIGURA 44 – CAC DO FURO 144

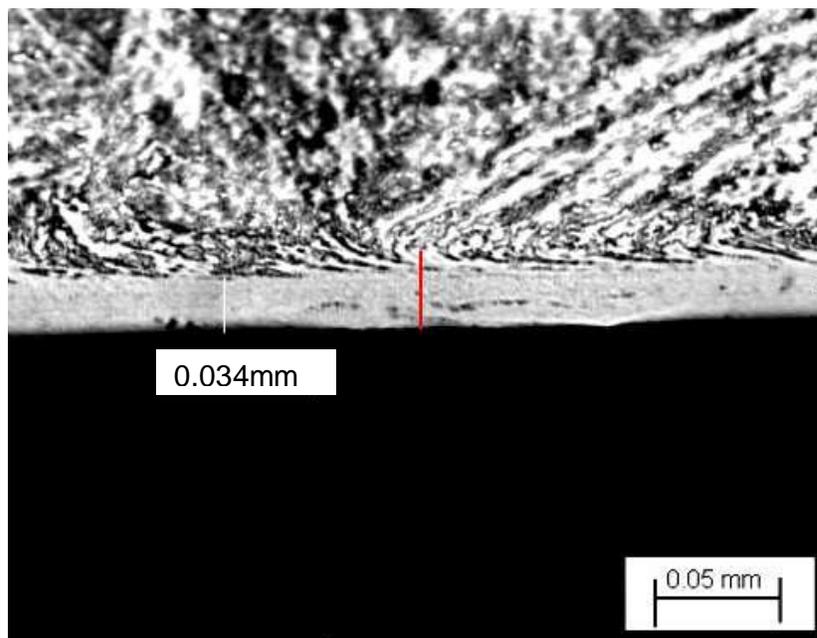


FIGURA 45 – CAC DO FURO 272

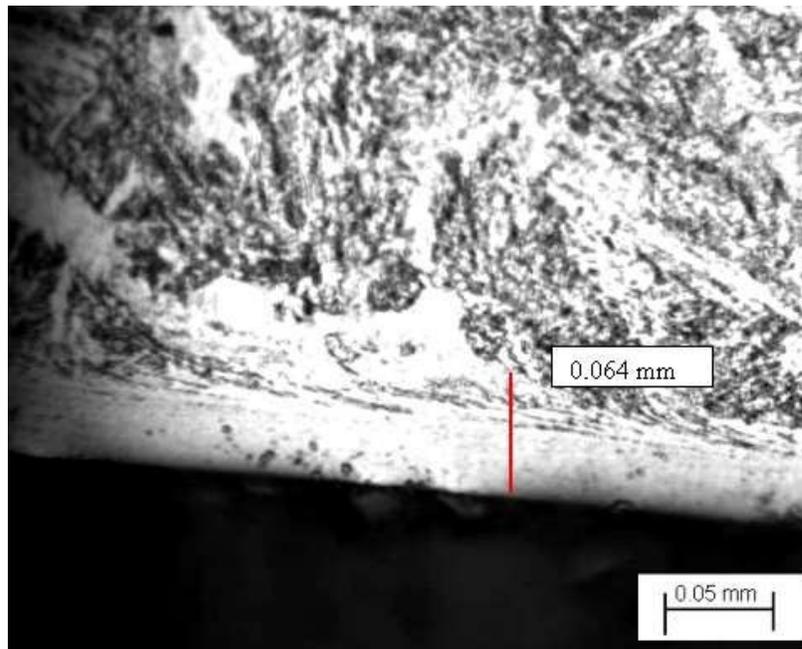


FIGURA 46 – CAC DO FURO 336

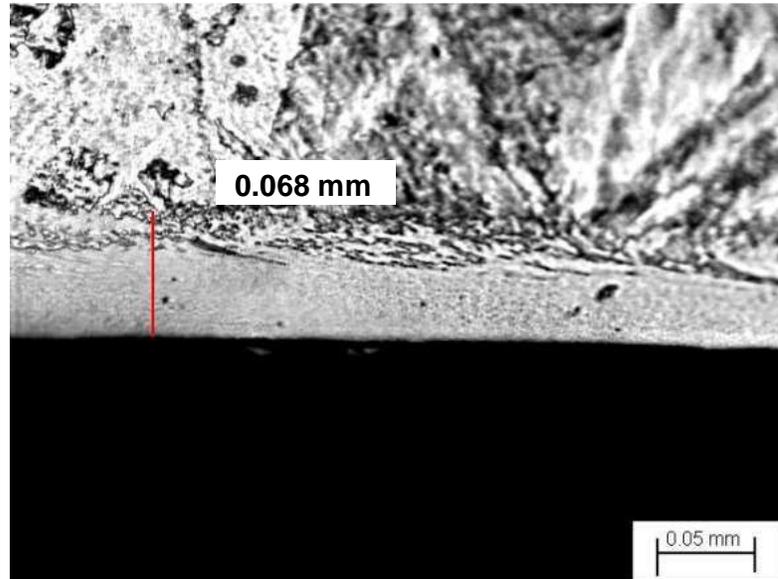


FIGURA 47 – CAC DO FURO 464

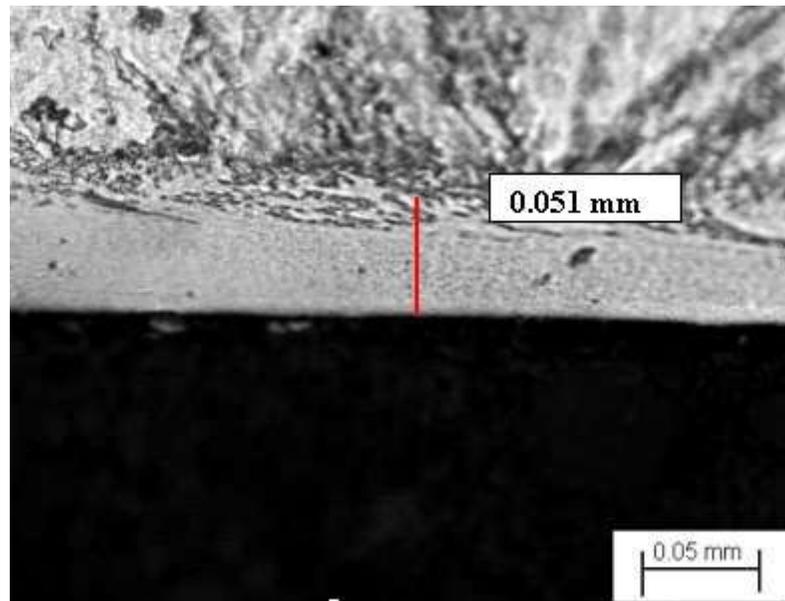


FIGURA 48 – CAC DO FURO 496

Com o acompanhamento das imagens das CACs ilustradas nas Figuras 43 à 48, observa-se o comportamento assumido pela microestrutura das superfícies e subsuperfícies das amostras analisadas. Tal comportamento pode ser descrito como sendo uma evolução nos valores identificados de profundidade da CAC nas amostras próximas ao fim de vida da broca (furo 464, profundidade da CAC= 0,068mm, Figura 47), em relação às amostras próximas ao início de vida da broca (furo 16, profundidade da CAC= 0.015mm, Figura 43, e chegando ao fim de vida da broca (furo 496), com uma profundidade da CAC = 0.051mm, demonstrando um pequeno declínio no comportamento de evolução da CAC, como mostra a Figura 48.

Ainda referente a este conjunto de amostras, foi feita uma comparação entre o levantamento da profundidade da CAC ao longo do ensaio utilizando recursos de análise de imagem, com os dados obtidos nos ensaios de microdureza. Para melhor compreender tal relação o gráfico da Figura 49 apresenta simultaneamente as duas seqüências de dados, medindo as profundidades de camadas identificadas nos dois métodos de análises.

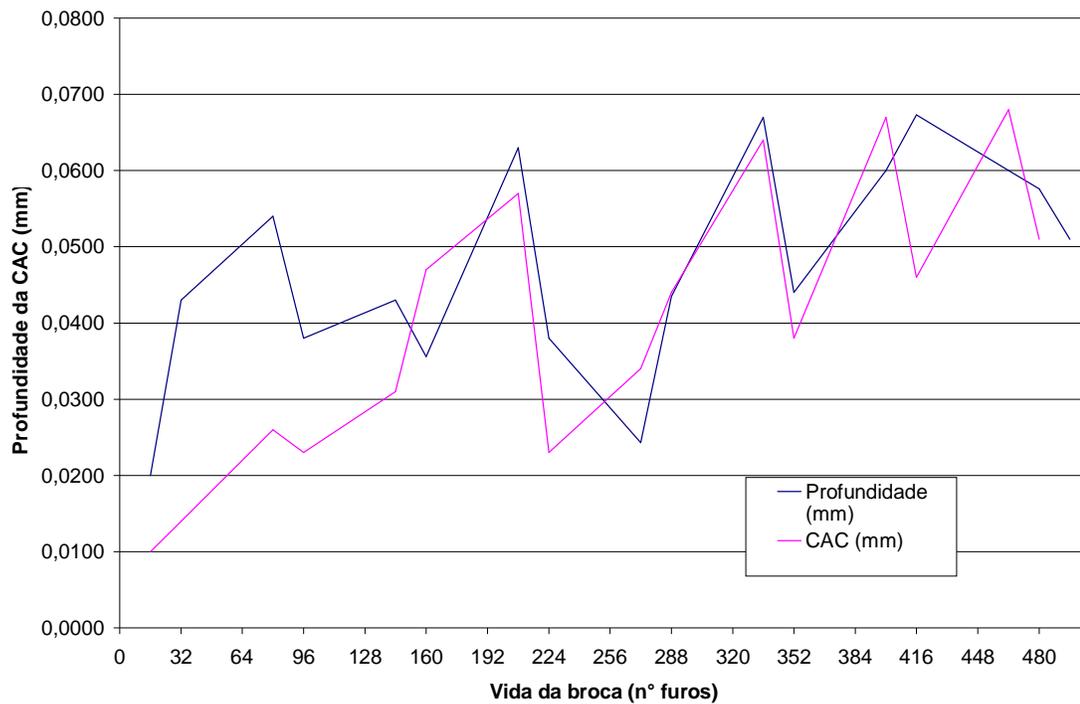


FIGURA 49 – ANÁLISE DE IMAGEM X ANÁLISE DE MICRODUREZA

No gráfico da Figura 49, o que se percebe é uma tendência similar de comportamento ocorrido em ambas análises (microdureza e análise de Imagens). Um resultado acaba por sustentar o outro, em uma confirmação de que ocorreu de fato alguma espécie de transformação na microestrutura do material do corpo de prova, após a realização do ensaio de furação.

Para completar as análises deste item, optou-se por repetir a estratégia adotada acima, na qual realizou-se uma comparação de dados da análise de microdureza desenvolvida no item anterior com os obtidos na análise de imagens. Porém, desta vez realiza-se uma análise comparativa com totalidade das amostras analisadas no item anterior (17 amostras), confirmando a existência de uma correlação entre os dois comportamentos analisados (CAC e Microdureza). Ver Figura 50.

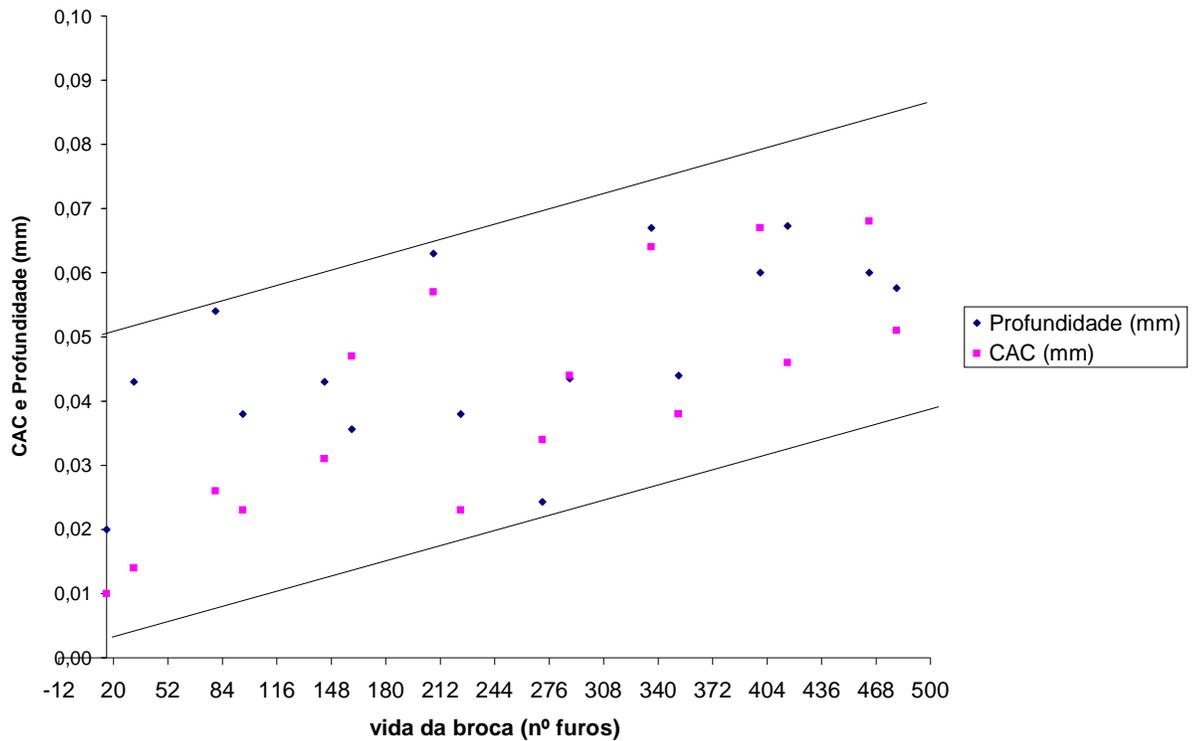


FIGURA 50 – ANÁLISE DE IMAGEM X ANÁLISE DE MICRODUREZA DO CONJUNTO

Finalizando essas análises comparativas, a Figura 51 dá ao leitor uma idéia de como se comporta a característica mecânica de microdureza ao longo da superfície e subsuperfície das amostras aqui analisadas. Para tanto foi sobreposta uma imagem de análise da CAC a um gráfico com os dados da análise de microdureza da mesma amostra (amostra do furo 464).

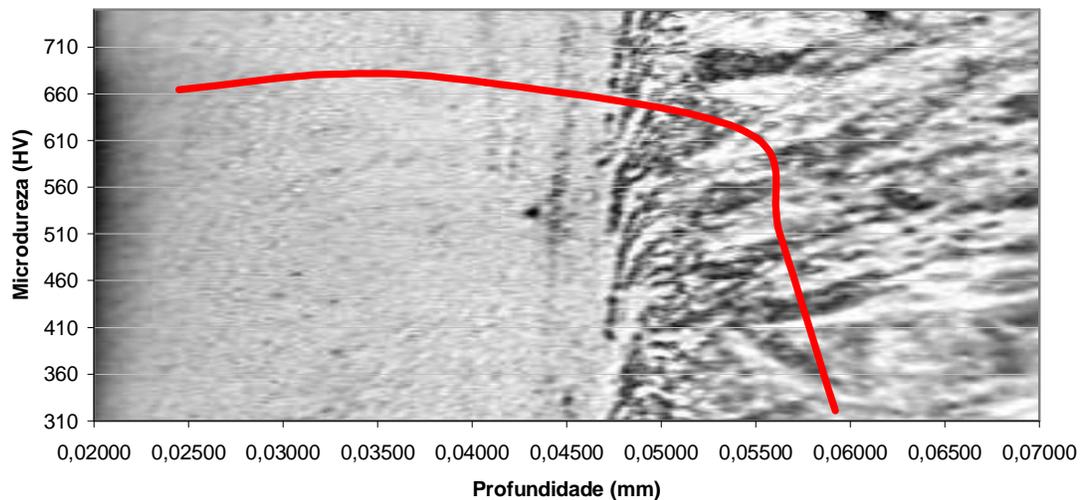


FIGURA 51 – COMPOSIÇÃO DE ANÁLISES

Observa-se claramente que na região mais clara da imagem, onde ocorreu a formação da CAC, a microdureza tem maior valor. Na região em que a imagem mostra a microestrutura sem deformação (a partir de 0,05mm de profundidade), a microdureza sofre um decréscimo significativo, até chegar ao valor de referência (310 HV). E na região intermediária (entre 0,045 e 0,05 mm), a microdureza tem um pequeno decréscimo, mas ainda mantém-se com valores elevados devido à deformação dos grãos da estrutura do material (um provável encruamento do material).

6.4. ANÁLISE DE TENSÕES

Os resultados obtidos retratam o comportamento das tensões superficiais tanto ao longo da superfície de referência do corpo de prova, a qual não teve um contato direto com a ferramenta mas sofreu solicitações provenientes do ensaio, quanto da superfície usinada (parede do furo). As posições nas quais foram realizadas as medições estão indicadas na Figura 25 e estão

identificadas como A (superfície de referência da peça), B e C (parede do furo), segundo dados do Capítulo 5 deste trabalho.

O gráfico da Figuras 52 mostra os resultados e o comportamento da tensão superficial nas três posições indicadas ao longo da vida da broca, bem como o valor de referência da tensão, medido em uma região da peça que não foi submetida ao processo de furação, é importante destacar o fato de que os valores no eixo Y, entre parenteses, referentes a tensões de compressão.

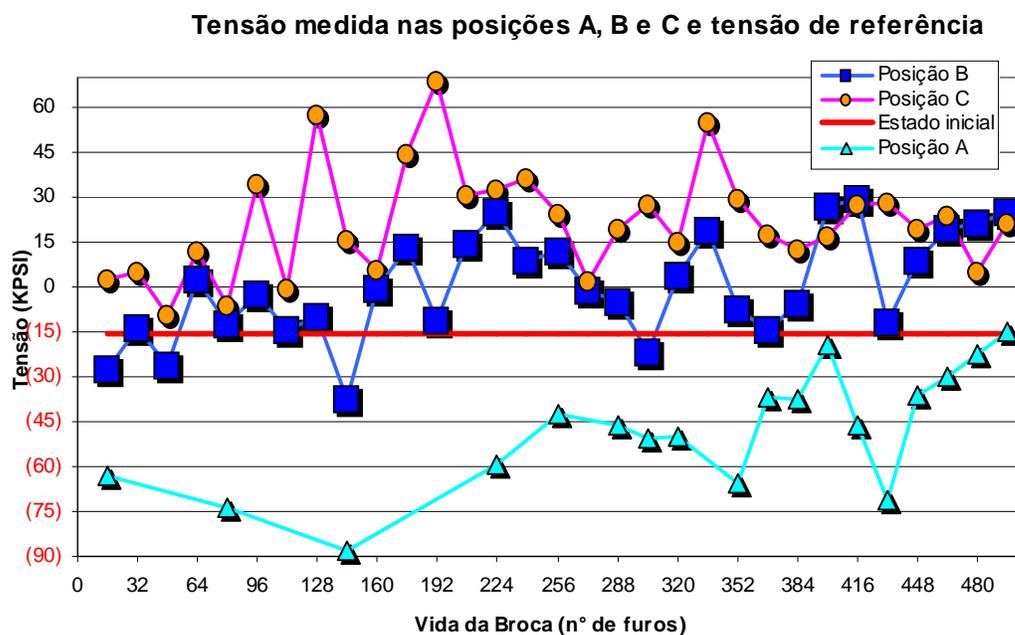


FIGURA 52 – CORRELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE TENSÃO

A análise desse gráfico mostra que:

- na superfície do corpo de prova (posição A) as tensões foram todas de compressão, mas com a tendência de redução em direção à linha de neutralidade (tensão zero);

- na posição B houve uma distribuição das tensões entre compressão, principalmente no início da vida da broca, e tração, na fase em que a broca encontrava-se já com meia vida. O gráfico da Figura 53 mostra a proporção em que se deu essa distribuição;
- na posição C houve uma maior concentração das tensões de tração. O gráfico da Figura 54 mostra a proporção em que se deu essa distribuição.

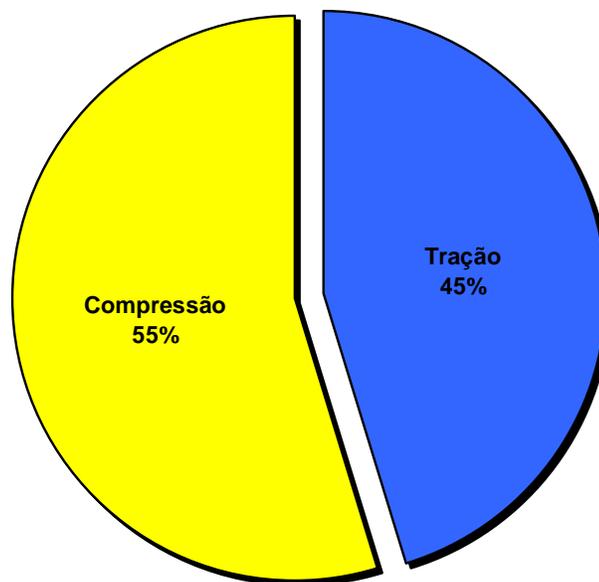


FIGURA 53 – DISTRIBUIÇÃO DO TIPO DE TENSÃO NA POSIÇÃO B

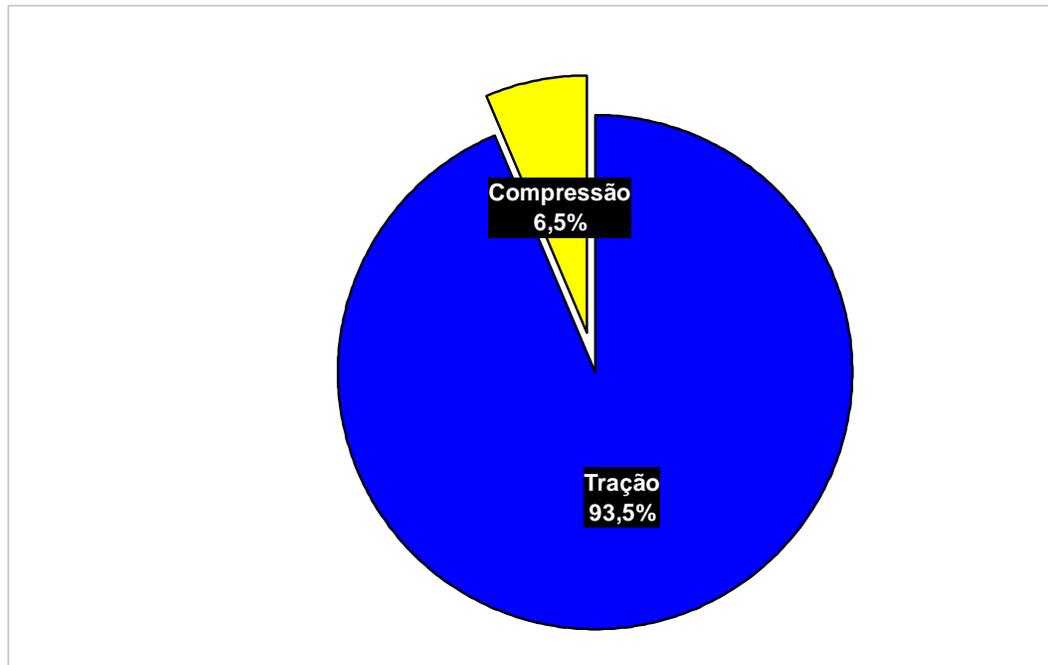


FIGURA 54 - DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE TENSÃO NA POSIÇÃO C

Em todos os casos nota-se que existe uma tendência de crescimento da tensão rumo ao estado de tração, indicando que a perda de corte da aresta principal da broca induz a peça a um estado de tensão de tração indesejável, pois o furo pode ser um ponto no qual uma trinca ou outro tipo de falha venha a surgir.

Este comportamento da tensão de variação ao longo do corpo de prova pode também ser adotado como um indicativo de que algo provavelmente está ocorrendo com a integridade do material, uma vez que praticamente todos os valores estão muito distantes do valor de referência do estado inicial de tensão do corpo de prova.

As diferenças dos comportamentos do estado de tensão podem estar ligadas às diferenças das taxas de transferência de calor, tendo em vista o fato de que as posições analisadas estão distribuídas em regiões diferentes do corpo de

prova, como demonstrado na Figura 25, do item 5.2.3., deste trabalho. Nestas regiões distintas do corpo de prova existem diferenças notáveis no que diz respeito ao comportamento de resfriamento do material, tendo em vista as variáveis envolvidas (espessura do material, exposição ao ar, entre outras).

6.5. RELAÇÕES ENTRE OS RESULTADOS DAS ANÁLISES

Este item tem como propósito fazer uma análise exploratória entre os dados obtidos nas diferentes análises pelas quais passou o corpo de prova.

Inicialmente é feita uma análise comparativa do comportamento de diâmetro dos furos ao longo da vida da broca com o comportamento da CAC verificada tanto pela microdureza, como pela análise de imagem (Figura 55).

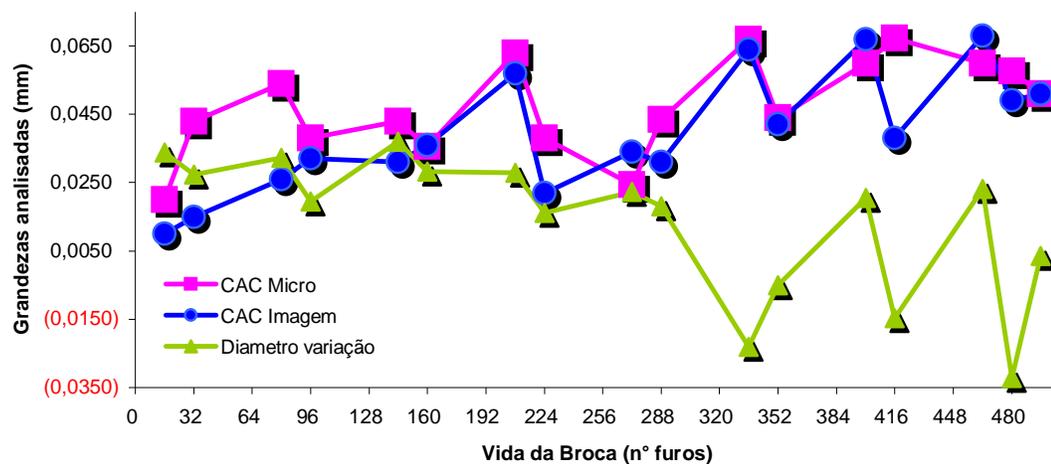


FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS CAC E DO DIÂMETRO

Nota-se no gráfico da Figura 55 um comportamento com pouca dispersão das grandezas relacionadas até determinado ponto do processo, por volta do furo 300; a partir daí as grandezas analisadas sofrem uma alteração significativa em seus respectivos comportamentos, sendo que a tendência de redução já identificada anteriormente no diâmetro está associada a um crescimento da CAC.

Na Figura 56 estão apresentados os comportamentos da microdureza medida e da tensão superficial nos pontos B e C das amostras. A microdureza está aqui expressa em HRC (Rockwell C) para facilitar a visualização no gráfico. Nota-se que o comportamento da tensão na posição B, também por volta do furo 300, passa a ser muito próximo do comportamento da microdureza. Já na posição C esse indicativo de aproximação do comportamento em relação à microdureza apresenta-se com menor clareza. Mesmo assim, essas três grandezas também podem estar indicando a existência de um ponto de fim de processo.

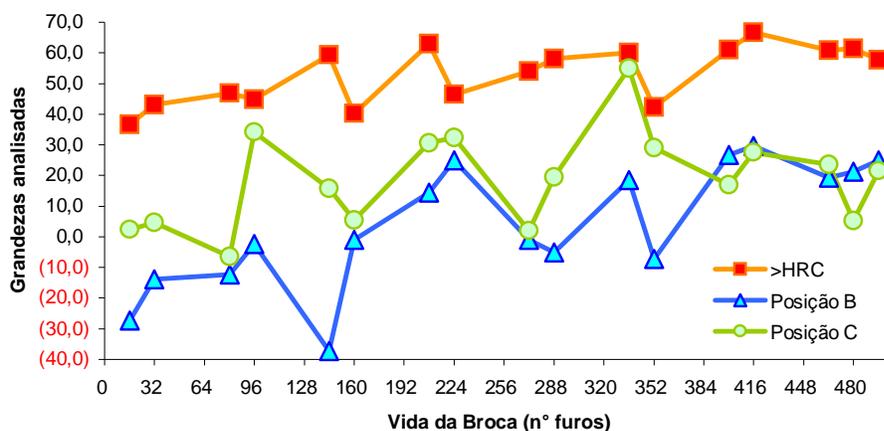


FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA MICRODUREZA E DAS TENSÕES

Para identificar com maior clareza a existência de um ponto de fim de processo através das possíveis correlações entre tensão superficial e microdureza, foi também realizada uma análise do comportamento da tensão em comparação ao da formação da CAC observada tanto pela análise de imagem, como pela microdureza (Figura 57).

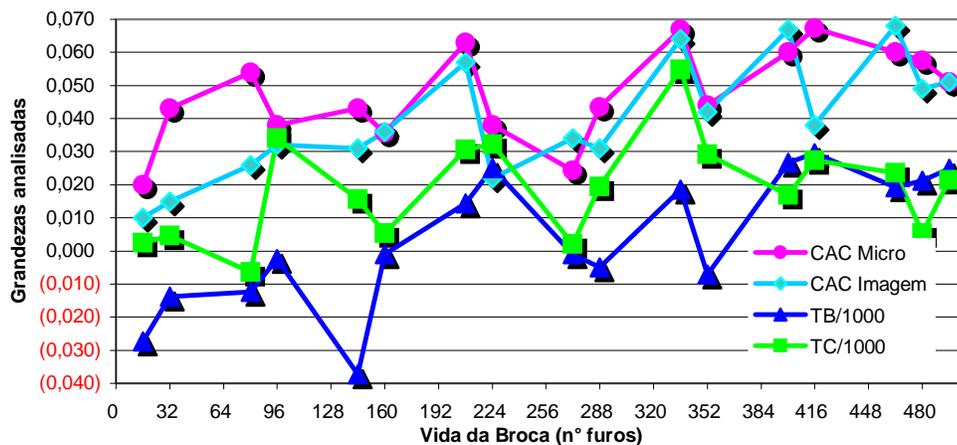


FIGURA 57 – COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES E CACs

No gráfico da Figura 57 é possível perceber que nos pontos indicados anteriormente como sendo o provável fim de processo - em torno do furo 300 - as tensões tendem a subir e a CAC alcança valores elevados que podem comprometer a peça no momento de sua utilização.

Finalmente, analisando-se o comportamento da variação do diâmetro juntamente com a variação do perpendicularismo, identifica-se claramente a existência desse momento de fim de processo quando ambas grandezas começam a apresentar dispersão muito grande em seus respectivos comportamentos (Figura 58).

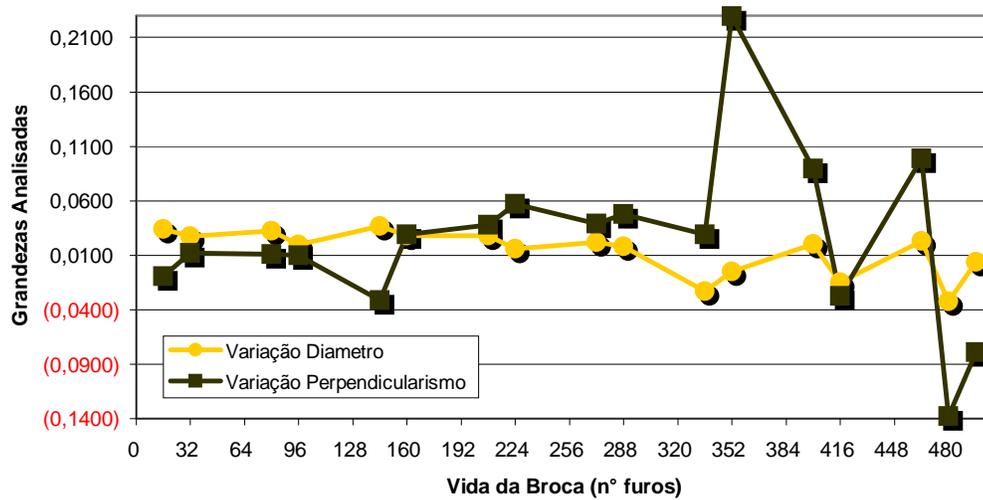


FIGURA 58 – COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO DIÂMETRO E DO PERPENDICULARISMO

Apesar da tendência de redução observada no diâmetro, nota-se que esta vem acompanhada de uma grande variação no perpendicularismo, o que por sua vez é indesejado em elementos funcionais que devem servir como referência de posicionamento ou como passagem para elementos de fixação.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados expostos, conclui-se que:

- √ existe um limite de utilização da broca. Esse limite pode ser considerado como o fim de processo, e pode ser apontado através do acompanhamento prévio dos MmdQ;
- √ a análise isolada do diâmetro pode levar a conclusões equivocadas, pois este tem um comportamento de aproximação do valor nominal, não indicando a existência de outros desvios dos MmdQ que podem ocorrer;
- √ a variação de perpendicularismo, bem como a variação do desvio de localização dos furos, são bons critérios para indicar o fim do processo, pois não necessitam de análises destrutivas, para tanto é necessário fazer considerações as condições das máquinas ferramenta.
- √ o desgaste da broca influencia os desvios de perpendicularismo e de localização, comprometendo os resultados finais do processo;
- √ mesmo antes do fim do processo, a formação da CAC foi identificada tanto pelo método da microdureza, como pelo método da análise de imagem. O surgimento dessa camada pode afetar o uso da peça caso não seja realizada uma outra operação de normalização na peça;
- √ a utilização de parâmetros otimizados no processo induz à formação da CAC e compromete a integridade superficial dos furos obtidos. Fica novamente evidente que o uso da broca até o fim da vida não é aconselhável;
- √ o uso da furação otimizada e sem o fluido de corte é viável até o ponto de fim de processo. Utilizar a broca além desse ponto (ou até o fim da vida)

pode induzir problemas nos MmdQ que podem resultar em falha no uso da peça (fratura ou trinca) ou na realização de uma outra fase de fabricação para corrigir os problemas identificados: desvios de perpendicularismo, de posição, surgimento da CAC e existência de tensões residuais, especialmente as de tração;

- √ com a identificação do ponto de fim de processo consegue-se condições de desgaste que possibilitam o reaproveitamento da ferramenta, o que é muito interessante do ponto de vista financeiro, pois possibilita a utilização dos parâmetros otimizados (alta produtividade) e o reaproveitamento da broca (economia em compra de ferramentas).

Trabalhos Futuros

Como decorrência do presente trabalho surgem as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- √ análise do gradiente de temperatura do material pós usinagem, realizado em paralelo a uma análise em tempo real da temperatura do conjunto ferramenta/cavaco/peça no momento do ensaio;
- √ análise mais aprofundada das condições da broca após a usinagem (geometria, desgaste, alterações microestruturais, etc.);
- √ levantamento detalhado do custo de um processo similar utilizando a estratégia de fim de processo, e fazendo na broca as reafiações possíveis.
- √ Utilize as mesmas ferramentas utilizadas variando o tipo dos materiais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O. L. RODRIGUES, A. C. S. LIRANI, J. 1977; “Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões”. São Paulo, Ed. Edgard Blucher da Universidade de São Paulo. 296p.

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

BALAKSHIN, B. 1983; “Fundamentals of Manufacturing Engineering”. Cap. I – IV, tradução de ROZENFELD, H. Apostila Laboratório de Ferramentas, São Carlos. 194p.

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

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 www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos. Acessado em novembro de 2001.

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

CRUZ, A. R. Jr. Processo de Furação Escola de Engenharia de São Carlos Departamento de Engenharia Mecânica. São Carlos, 1978 (apostila).

DAMASCENO, D. Análise das Tensões Residuais Após Torneamento e Retificação do Aço ABNT 52100 Endurecido. Faculdade de Engenharia

Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, dezembro 1993, 97p, Dissertação (Mestrado).

DEGARMO, P. E. Material And Processes In Manufacturing. Ed. Macmillan Publishing. Printed in the United States Of America, 1979. Fifth edition, 857p

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

DINIZ, A. E, COPPINI, N. L, MRCONDES, F. C., Tecnologia de Usinagem dos Materiais. Ed. Art Liber Editora, SP, 1999 1° ed.244 p.

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

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

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

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

GUNTER SPUR, H. C. HOK TIO, T. Danos à Camada Superficial Na Usinagem de Cerâmica Avançada, Máquinas e Metais, janeiro, 1991. Ed Aranda. p 64-72.

HEISEL, U. & LUTZ, M., Pesquisa de fluido de refrigeração e de lubrificação, Máquinas e Metais, maio, 1998. Ed. Aranda. p. 40-49

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. p20 – 31.

KALHOFER, E. Dry Machining – Principles and Aplications. Anais do 2° 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. e Internet: WWW.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos, Acesso, dia 05 de Novembro de 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 Industrias Estão Tendo que Orientar Ecologicamente Seus Processos Produtivos. Máquinas e Metais, Vol. 387, p22-29, abril 1998. Ed Aranda.

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

LIMA, A. VIEIRA, M. JR; 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 2001, 17 – 19 de outubro de 2001, Salvador. BA

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

LYSINGHT, V. E., Metal Progr., (78), p93, 1960.

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

MATEOS, A. G. Tolerâncias e Ajustes, tradução Neiva, A. C. Ed. Polígono. São Paulo, 1974. p161 – 405.

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, abril de 2001, Curitiba – Paraná. CD dos Anais do COBEF 01

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

NAKAGAWA, H. Mínima Quantidade de Lubrificação não Agride o Meio Ambiente, Revista: Maquinas e Metais, ED. Aranda, agosto 2000, p 40-49.

NOVASKI, O. J. RIOS, M. Vantagens do Uso de Fluidos Sintéticos Na Usinagem. Internet: WWW.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos, Acesso, Novembro de 2001.

NOVASKI, O. J. Introdução À Engenharia de Fabricação Mecânica. Ed. Edgard Blucher Ltda. 1998, p. 47 – 80.

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

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 1999. Ed. Aranda.

SALES, W. F., Machado, A. R., Mello, J. D. B. Influência do Fluido de Corte no Desgaste de Brocas de Aço Rápido. In: IV Seminário de Desgaste. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo/SP, Ed: 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", [A Contribution to Dry Cutting and to Minimum Quantity of Fluid in Steel Turning], MSc Dissertation in Mechanical Engineering – UNICAMP, Campinas, SP, 2000.

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.

SOTO, M. Rumo Ao Novo Milênio Com Ferramentas de Alta Performance. O Mundo da Usinagem. Vol. 4, P 10 – 16, abril 2000. Publicação da Divisão Coromant da Sandvik do Brasil.

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

TARASOV, L. P. THIBAUT, N. W., Trans. ASM, (38), p331, 1947.

VIEIRA, M. Avaliação da Dureza de Rebolos em Trabalho através do Uso da Emissão Acústica na Dressagem. Tese de Doutorado, EESC - USP, 1996. P. 131.

VIEIRA, M. J. 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/SP, Ed: Édile, Julho de 1998.p. 183 a 206.

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

WADA, R. Há de Haver um Conceito bem Diferente do Atual Para as Máquinas de Amanhã. Máquinas e Metais, Vol. 376, p20 – 43, maio 1997. Ed. Aranda.

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

YUHARA, D. A. Furação Com Pastilhas Intercambiáveis de Metal Duro. Mundo Mecânico, Vol. 74, p37 – 41, setembro de 1982. Ed. Gruenwald Ltda.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

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

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 - 236.1 – 236.

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.

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,

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, Ill Research Institute, Chicago, Illinois, 1978, USA, 7-9 June, 7p.

KLOCKE, F. & EISENBLÄTTER, G., Presented at the Opening Session Dry Cutting, Annals of the CIRP, Vol. 46 (2), p. 519-526, 1997.

MACHADO, A.R. and WALLBANK, J., 1997, "The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining" , Wear, vol. 210, NO. 1-2, p 76 – 82.

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

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

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 Operation], Proceedings of Brazilian National Conference on Mechanical Engineering – CONEM 2000, 7 - 11 of August, Natal, RN, In CD Rom, 2000, Paper HC 9246.

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

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.

TEIXEIRA FILHO, F. FERREIRA, J. R. SANTOS, J. N. & DINIZ, A. E. "Utilização de Refrigeração/Lubrificação em Torneamento de Aço Endurecido", [Use of Cooling/Lubricity in the Hard Steel Turning Process], Proceedings of Machining Conference, São Paulo, SP, 2000, p. 1 - 25.

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

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

VIEIRA, J. 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.

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

ANEXOS

Anexo I	Certificado de Calibração do Equipamento de Medir Tensão Residual
Anexo II	Certificado de Calibração do Microdurometro
Anexo III	Referência Catalogo da Máquina de Medir por Coordenada
Anexo IV	Análise Química da Broca
Anexo V	Análises de Microdurezas
Anexo VI	Análises de Imagens (CAC)

ANEXO I

Certificado de Calibração do Equipamento de Medir Tensão Residual

2008 12:22 1408248418

METRO DESIGN INC

PAGE 03

00160

284730009-3#1

Certificate of Calibration

For

Residual Stress Reference Samples

The below listed serialized sample was prepared as a reference specimen for Residual Stress measurements by X-Ray Diffraction. The samples material, heat treating and etching depth are listed along with the direction, size and location of the measured area. These samples were primarily constructed for the FASTRESS Residual Stress System, but can be used on any X-Ray Diffraction System.

Serial Number: MDI A-008
 Material Type: S100 STEEL
 Heat Treating: Hrc 55
 Shot Peening: Cut Wire SHOT
 Chemical Etch Depth: .001"

Round Robin Metro Design Inc:

Average: High: Low:

Residual Stress: -137.6 -142.0 -130.0
 (Kpsi)

Source: Standards were developed by Metro Design Inc.

Standard Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Nominal Value: -137.6 Kpsi

DO PADRÃO

Measurement Uncertainty: +/- 10 Kpsi ERRO MÁXIMO PERMITIDO

Measurement Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Residual Stress by FASTRESS Method:

Certificate of Calibration

For

Residual Stress Reference Samples

The below listed serialized sample was prepared as a reference specimen for Residual Stress measurements by X-Ray Diffraction. The samples material, heat treating and etching depth are listed along with the direction, size and location of the measured area. These samples were primarily constructed for the FASTRESS Residual Stress System, but can be used on any X-Ray Diffraction System.

Serial Number: MDI SR-002
 Material Type: 5100 STEEL
 Heat Treating: Hrc 55
 Shot Peening: Cut Wire SHOT
 Chemical Etch Depth: .001"

Round Robin Metro Design Inc:

Average: High: Low:

Residual Stress: - 99.8 - 106.0 -85.0
 (Kpsi)

Source: Standards were developed by Metro Design Inc.

Standard Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Nominal Value: - 99.8 Kpsi

Measurement Uncertainty: +/- 10 Kpsi

Measurement Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Residual Stress by FASTRESS Method:

Location: The Stress measurement is taken on the etched surface, centered from side to side. Area is app. .045" Diam.
 The diagram below shows the exact location.

Metro Design Inc. PO Box 248 Elyria, OH 44036 PH: 440 324-4700 FAX: 440 324-3410

Certificate of Calibration

For

Residual Stress Reference Samples

The below listed serialized sample was prepared as a reference specimen for Residual Stress measurements by X-Ray Diffraction. The samples material, heat treating and etching depth are listed along with the direction, size and location of the measured area. These samples were primarily constructed for the FASTRESS Residual Stress System, but can be used on any X-Ray Diffraction System.

Serial Number: MDI 8620-101
Material Type: 8620 STEEL
Heat Treating: Hrc 58
Shot Peening: Cut Wire SHOT
Chemical Etch Depth: .001"

Round Robin Metro Design Inc:

Average: High: Low:

Residual Stress: -109.9 -114.0 -106.0
(Kpsi)

Source: Standards were developed by Metro Design Inc.

Standard Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Nominal Value: -109.9 Kpsi

Measurement Uncertainty: +/- 10 Kpsi

Measurement Uncertainty: +/- 5 Kpsi

Residual Stress by FASTRESS Method:

*Location: The Stress measurement is taken on the etched surface,
 centered from side to side. Area is app. .045" Diam.
 The diagram below shows the exact location.*

Metro Design Inc. PO Box 248 Elyria, OH 44036 PH: 440.324.4700 FAX: 440.324.3410

ANEXO II

Certificado de Calibração do Microdurometro



INSTRUMENTAL INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA.
 Av. Leonardo da Vinci, 1051 A
 (Centro Comercial Jabaquara)
 Cep 04313-000 São Paulo - SP
 Tel.: (11) 5011-0901
 Fax.: (11) 5012-4650
 E-mail: instmed@terra.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 023

CLIENTE: LABMAT – ANÁLISE E ENSAIOS DE MATERIAIS.

DATA DA AFERIÇÃO: 25/05/2002

OBJETO: MICRO-DURÔMETRO – MICROMET 2103

FABRICANTE: BUEHLER LTD.

Nº DE SÉRIE: 525-MMTD-00145

INTERVALO DE AFERIÇÃO RECOMENDADO: ANUAL

PROCEDIMENTO DE AFERIÇÃO: MD 036/ 01

CONDIÇÕES AMBIENTAIS NO TESTE: Temperatura (22 ±1,5)°C

LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório

RESULTADOS: São expressos em milímetros (mm)

INCERTEZA DE MEDIÇÃO: +/- 1HV

A incerteza foi calculada com base no documento NAMAS NIS 3003 de 08/95, onde foram consideradas as incertezas do padrão do instrumento e outras influências.

01- Procedimento de medição: MM 036/01

A ocular micrométrica foi comparada com a escala de cristal de 1mm.

A calibração das microdurezas foi realizada pelo método indireto de leitura e os padrões utilizados estão listados conforme tabela abaixo:

DESCRIÇÃO	MODELO	Nº DO CERTIFICADO	DATA DA AFERIÇÃO
ESCALA	ES 001	8948/97	Julho 1997
PADRÃO	Vickers 220.7	999512	Junho 1999
PADRÃO	Vickers 504	994135	Junho 1999

Credenciamento no INMETRO sob Numero 039/ NIST



Certificado n.º 023

Cliente: LABMAT – ANÁLISE E ENSAIOS DE MATERIAIS.

Modelo: MICROMET 2103

Nº 525-MMTD-00145

02- Resultados da Calibração

Valor Real	Valor da Leitura	Erro de Indicação
µm	µm	µm
10.0	10.1	0.1
20.0	20.0	0.0
30.0	30.1	0.1
40.0	40.1	0.1
50.0	50.1	0.1
60.0	60.2	0.2
70.0	70.2	0.2
80.0	80.1	0.1
90.0	90.1	0.1
100.0	100.2	0.2
110.0	110.2	0.2
120.0	120.1	0.1
130.0	130.2	0.2
140.0	140.1	0.1
150.0	150.2	0.2

Padrão 994135	Padrão 999512
Carga 500g	Carga 100g
P1 506.1	P1 223,5
P2 506.1	P2 220,4
P3 506.1	P3 220,4
P4 510.9	P4 218,9
P5 508.5	P5 217.4
PM 507.54	PM 220.12

Observação: Os valores expressos é a média de 3 leituras.

ATESTAMOS QUE O EQUIPAMENTO EM REFERÊNCIA ESTÁ TOTALMENTE LIBERADO E APTO PARA A REALIZAÇÃO DE TRABALHOS A QUE SE DESTINA, CONFORME DETERMINAÇÕES E LIMITES ESTABELECIDOS PELO FABRICANTE BUEHLER LTD.

ESTE CERTIFICADO É VÁLIDO PARA O OBJETO ENSAIADO, NÃO SENDO EXTENSIVO A QUAISQUER LOTES MESMO QUE SENDO SIMILARES. A SUA REPRODUÇÃO, TOTAL OU PARCIAL DEPENDERÁ DE PRÉVIA AUTORIZAÇÃO FORMAL DA INSTRUMENTAL INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA.


Metrologista
Donizete Sanches

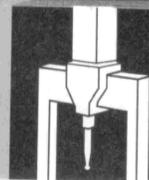
ANEXO III

Referência Catalogo da Máquina de Medir por Coordenada



Starrett®

MÁQUINAS DE MEDICIÓN POR COORDENADAS



AURORA™ - Especificaciones

Especificaciones de Acuerdo con la Norma ANSI B-89.1.12	Modelo		Modelo		Modelo		Modelo (DCC Somete) RGDC6440-24
	Manual	RGC2828-24	Manual	RGC4028-24	Manual	RGC4040-24	
	DCC	RGDC2828-24	DCC	RGDC4028-24	DCC	RGDC4040-24	
	Milímetros		Milímetros		Milímetros		Milímetros
Precisión Lineal (Ancho de banda) por Eje							
X	0,0051 mm		0,0051 mm		0,0076 mm		0,0076 mm
Y	0,0051 mm		0,0076 mm		0,0076 mm		0,01 mm
Z	0,0051 mm		0,0051 mm		0,0051 mm		0,0051 mm
Manual RGC							
Precisión Volumétrica (Ballbar de 508 mm)	0,01 mm		0,011 mm		0,012 mm		N/D
Repetibilidad (Ancho de Banda)	0,003 mm		0,003 mm		0,003 mm		N/D
RGDC - DCC ó con Joystick							
Precisión Volumétrica (Ballbar de 508 mm)	0,007 mm		0,009 mm		0,01 mm		0,013 mm
Repetibilidad (Ancho de Banda)	0,0025 mm		0,0025 mm		0,003 mm		0,003 mm
Repetibilidad con TP-200					0,0015 mm		
U₁, U₃ según VDI/VDE 2617			$U_1 = 3 + 4L/1000$ $U_3 = 4 + 5L/1000$		$U_1 = 4 + 4,5L/1000$ $U_3 = 5 + 5,0L/1000$		$U_1 = 3,5 + 4,5L/1000^{***}$ $U_3 = 5,0 + 5,0L/1000^{***}$
Velocidad Máxima					500 mm/seg.		
Aceleración Máxima					800 mm/seg.		
Capacidad de Medición							
X	711 mm		711 mm		1016 mm		1016 mm
Y	711 mm		1016 mm		1016 mm		1625 mm
Z	610 mm		610 mm		610 mm		610 mm
Dimensiones Totales							
X Anchura	1320 mm		1346 mm		1650 mm		1676 mm
Y Longitud	1565 mm		1870 mm		1870 mm		2490 mm
Z Altura	2715 mm		2715 mm		2715 mm		2715 mm
Cap. de Trab. Mesa de Medición							
Dimensiones Máx. Pieza							
Longitud	1400 mm		1715 mm		1715 mm		2324 mm
Anchura	840 mm		844 mm		1123 mm		1123 mm
Altura*	711 mm		711 mm		711 mm		736 mm
Peso**	454 kg		500 kg		545 kg		795 kg
Peso Bruto (aprox.)	1,814 kg		2,045 kg		2,500 kg		3,630 kg

*Espacio libre bajo el puente sin palpadores en el eje Z.

**Capacidad de peso adicional disponible.

***Especificaciones alta precisión solamente con TP-200 ó TP-7; $U_1 = 2,8 + 3L/1000$ y $U_3 = 4,0 + 4L/1000$.

Anexo IV

Análise Química da Broca

SQ: IDENTIFY

QUALITATIVE ELEMENT IDENTIFICATION

SAMPLE ID: BROCA TITEX

POSSIBLE IDENTIFICATION

SI KA OR W LA LB LG MA LB2 MZ1
 CO KA KB OR ER LA MA
 TI KA OR BA LA
 C KA

PEAK LISTING

	ENERGY	AREA	EL. AND LINE
1	0.242	590	C KA
2	1.371	915	W MZ1
3	1.786	32901	W MA
4	2.252	332	UNIDENTIFIED
5	4.507	2774	TI KA
6	6.915	5352	CO KA
7	7.637	566	CO KB
8	8.377	6996	W LA
9	9.639	2300	W LB
10	9.952	637	W LB2
11	11.273	466	W LG

SQ: SETUP DEFINITIONS

SQ: QUANTIFY

BROCA TITEX

Standardless Analysis
 20.0 kV 53.7 Degrees

Chi-sqd = 1.10

Element	Rel. K-ratio	Net Counts
Ti-K	0.04469 +/- 0.00255	3474 +/- 198
Co-K	0.17538 +/- 0.00593	7484 +/- 253
W -L	0.77993 +/- 0.02227	15795 +/- 451

ZAF Correction 20.00 kV 53.70 deg
 No. of Iterations = 3

Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Ti-K	0.044	0.855	1.188	0.985	1.001	11.80	4.38
Co-K	0.172	0.844	1.052	0.928	0.824	31.01	14.16
W -L	0.764	1.061	1.006	1.000	1.067	57.19	81.46
						Total=	100.00%

superficie

SQ: IDENTIFY

QUALITATIVE ELEMENT IDENTIFICATION

SAMPLE ID: BROCA TITEX/PONTUAL

POSSIBLE IDENTIFICATION

AL KA
 CO KA KB OR ER LA
 SI KA OR W LA LB MA
 W LA LB MA?
 TI KA OR BA LA
 FE KA
 C KA

PEAK LISTING

	ENERGY	AREA	EL. AND LINE
1	0.250	496	C KA
2	1.491	74798	AL KA
3	1.786	2210	SI KA OR W MA?
4	4.506	1655	TI KA
5	6.384	1117	FE KA
6	6.917	7502	CO KA
7	7.638	972	CO KB
8	8.383	2028	W LA
9	9.652	719	W LB

SQ: SETUP DEFINITIONS

SQ: QUANTIFY

BROCA TITEX/PONTUAL

Standardless Analysis

20.0 kV 53.7 Degrees

Chi-sqd = 1.04

Element	Rel. K-ratio	Net Counts
Ti-K	0.05434 +/- 0.00410	2012 +/- 152
Co-K	0.47715 +/- 0.01294	9700 +/- 263
W -L	0.40770 +/- 0.03503	3934 +/- 338
Fe-K	0.06081 +/- 0.00732	1438 +/- 173

ZAF Correction 20.00 kV 53.70 deg

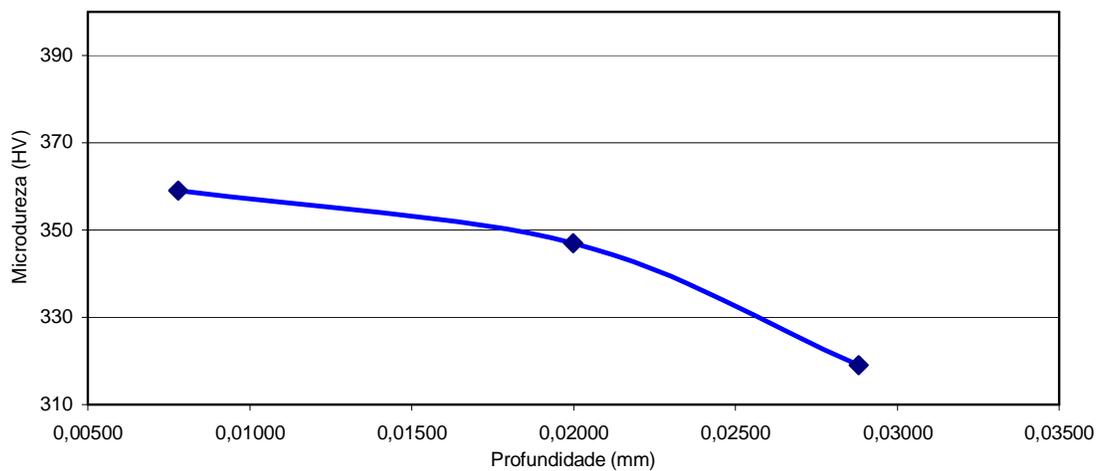
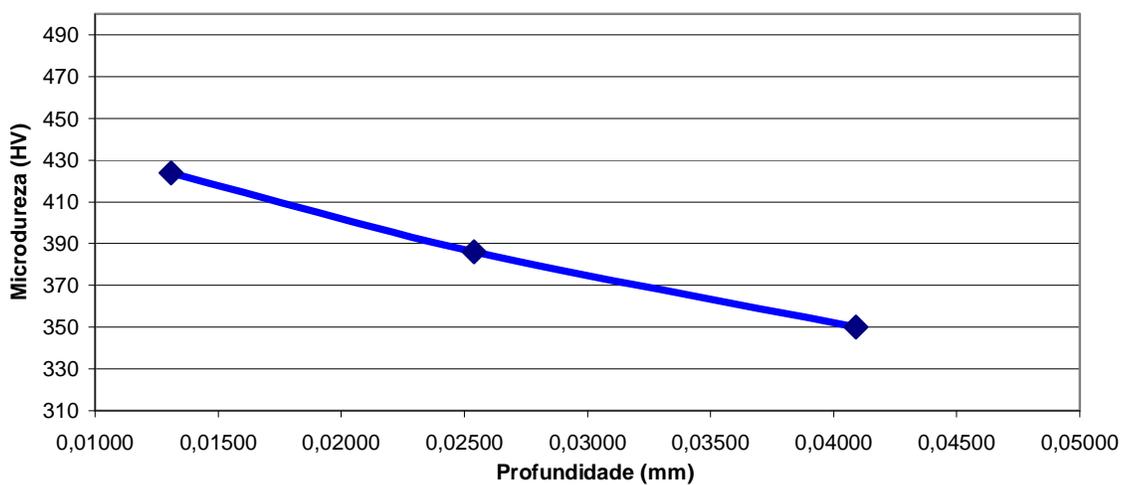
No. of Iterations = 3

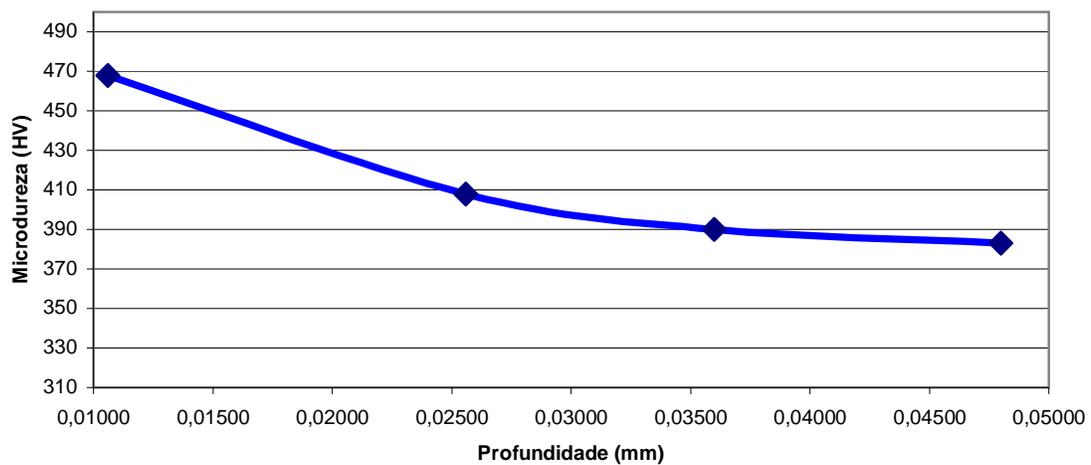
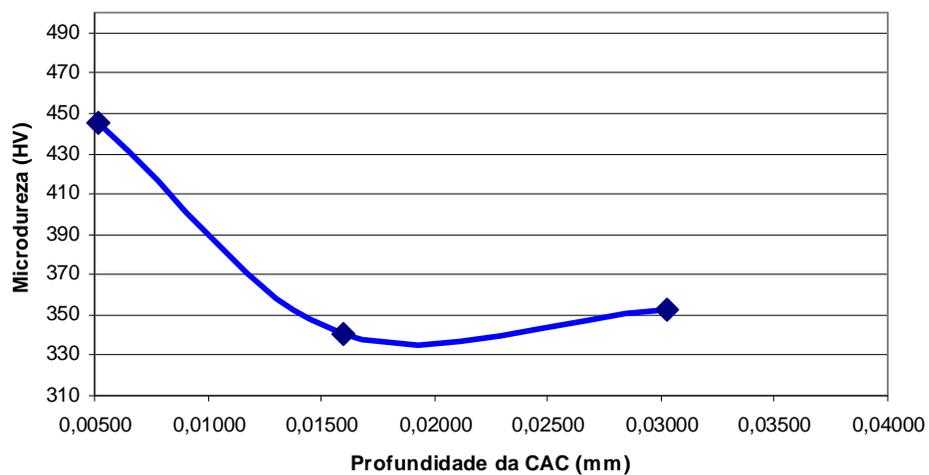
Element	K-ratio	Z	A	F	ZAF	Atom%	Wt%
Ti-K	0.053	0.925	1.116	0.968	0.999	9.36	5.29
Co-K	0.465	0.917	1.033	0.960	0.908	60.71	42.21
W -L	0.397	1.164	1.019	1.000	1.186	21.70	47.08
Fe-K	0.059	0.903	1.044	0.972	0.916	8.23	5.42
						Total=	100.00%

*K F

ANEXO V

Análises de Microdurezas

Micro dureza da CAC Furo 16*FIGURA 59 – ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 16***Microdureza da CAC Furo 32***FIGURA 60 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 32*

Microdureza da CAC Furo 80*FIGURA 61- ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 80***Microdureza da CAC F96***FIGURA 62 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 96*

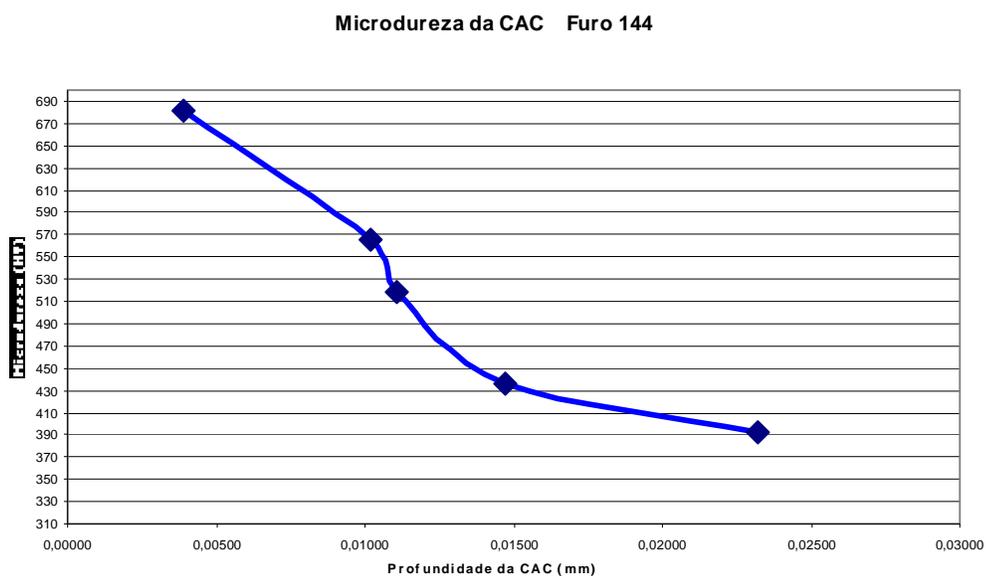


FIGURA 63 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 144

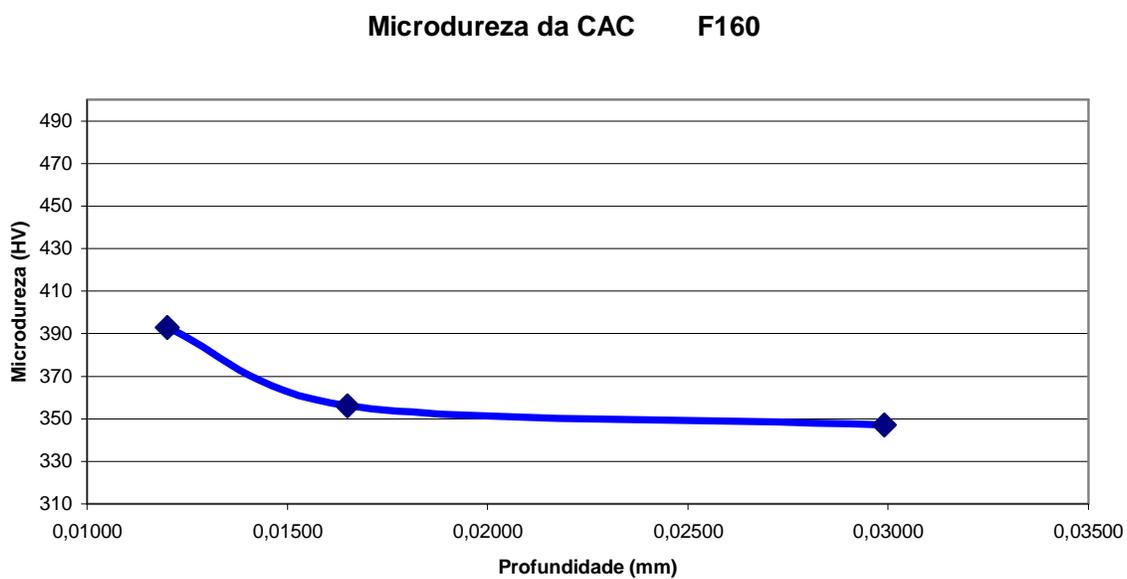


FIGURA 64 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 160

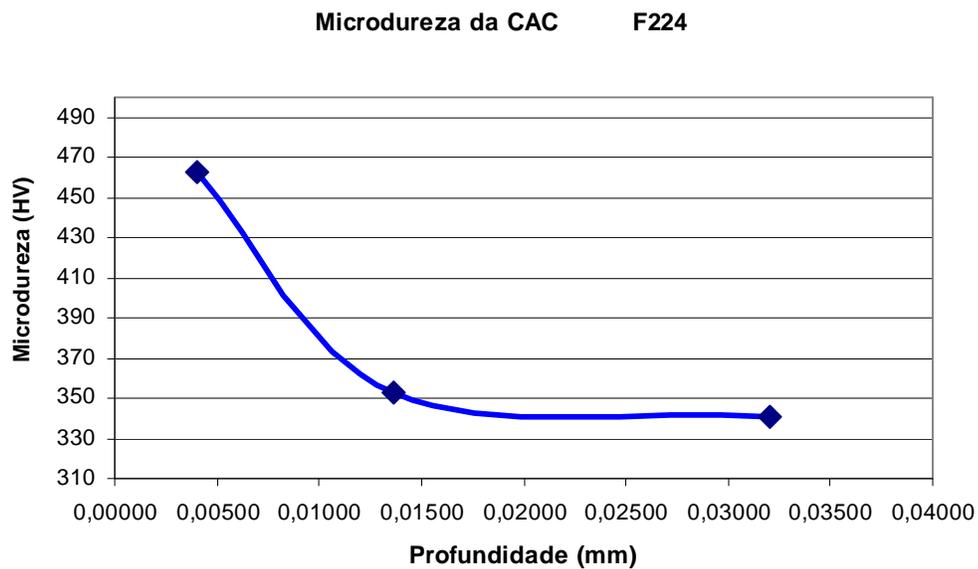


FIGURA 65 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 224

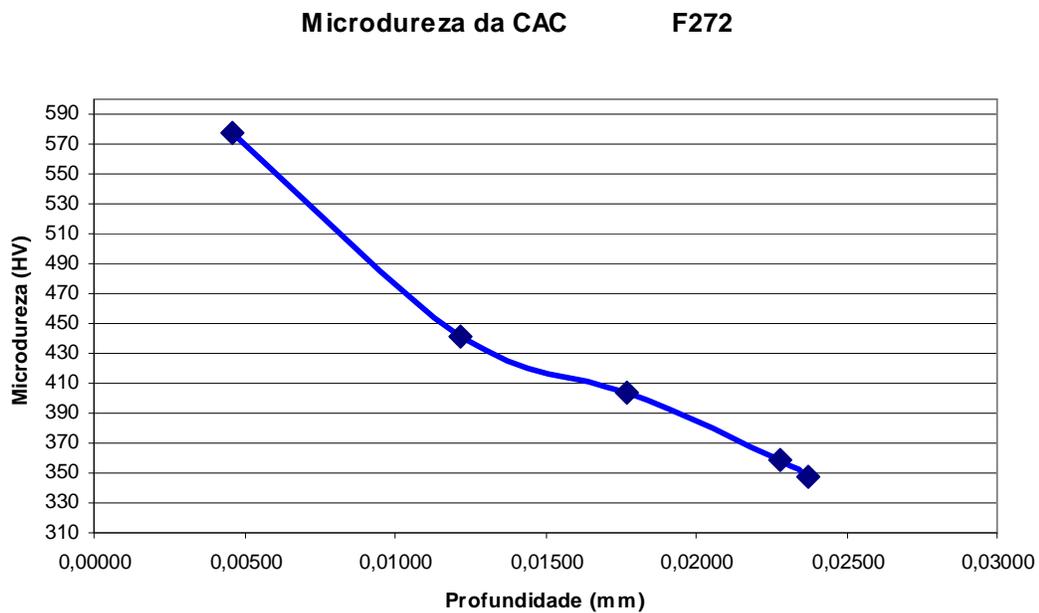


FIGURA 66 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 272

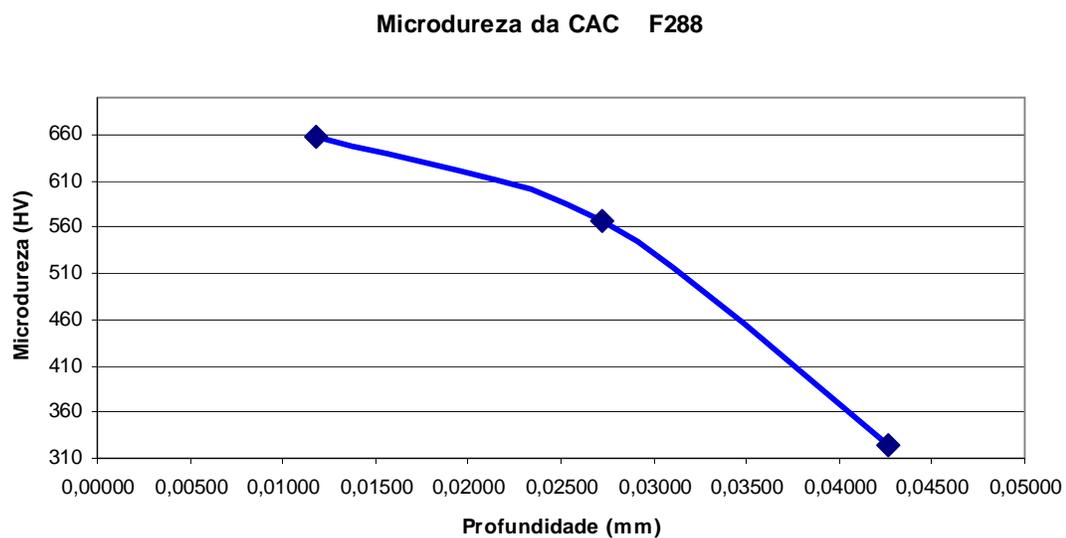


FIGURA 67 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 288

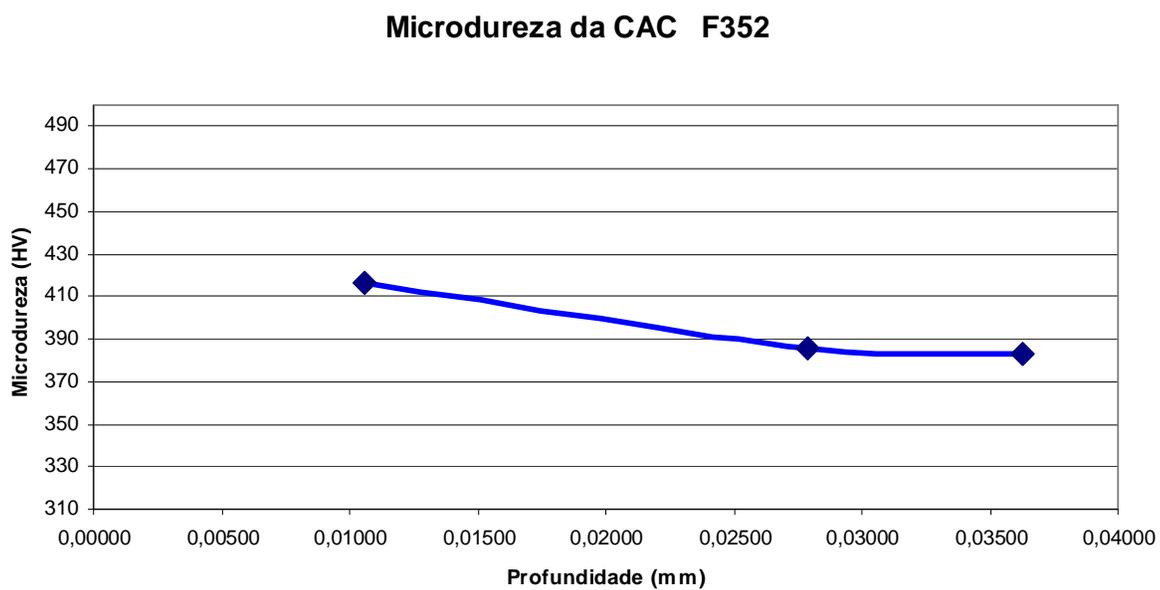


FIGURA 68 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 352

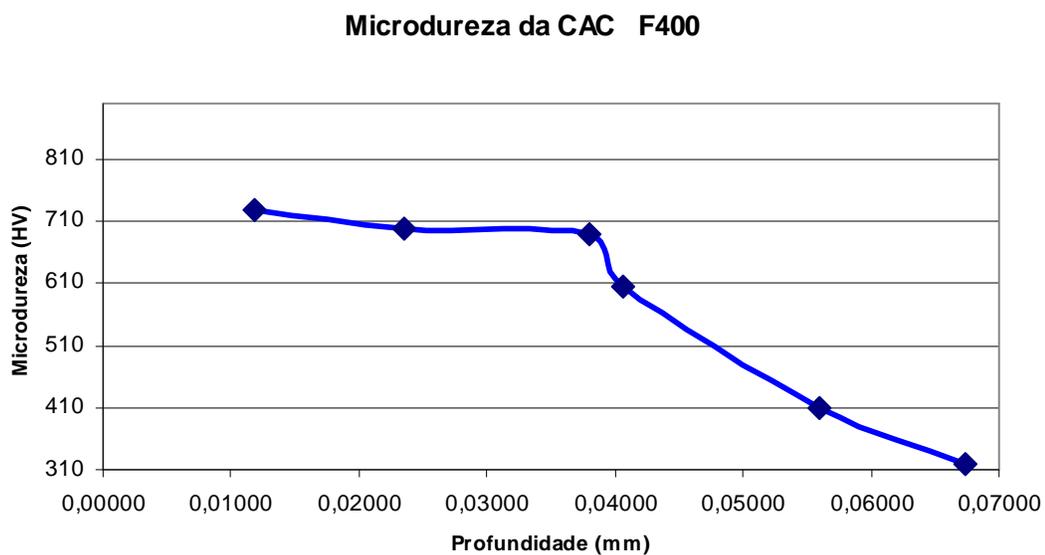


FIGURA 69 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 400

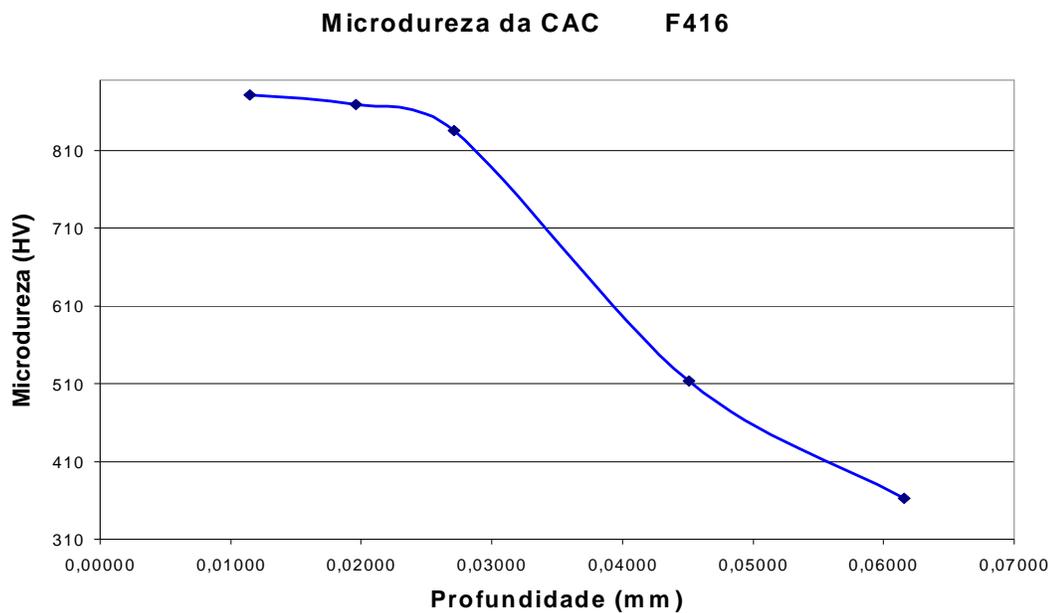
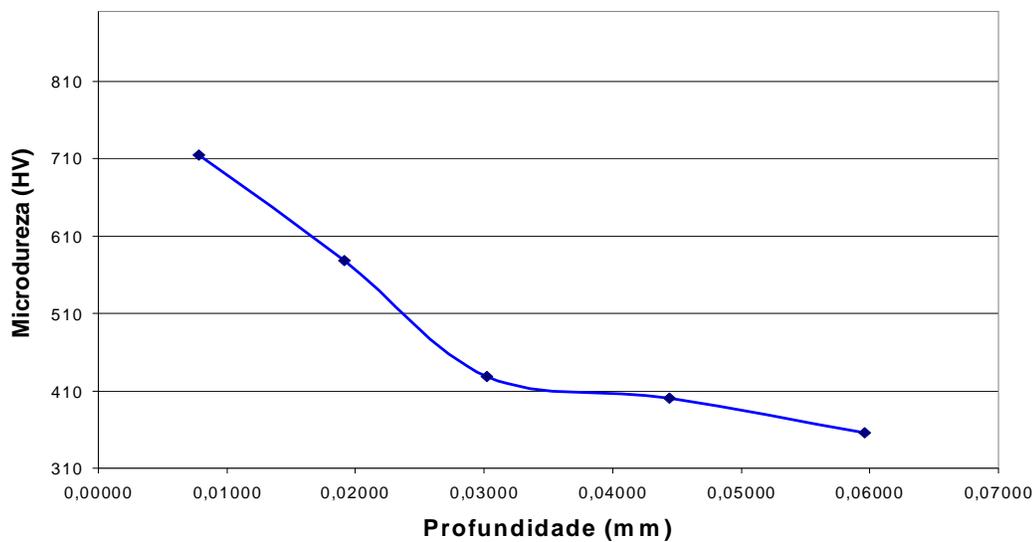
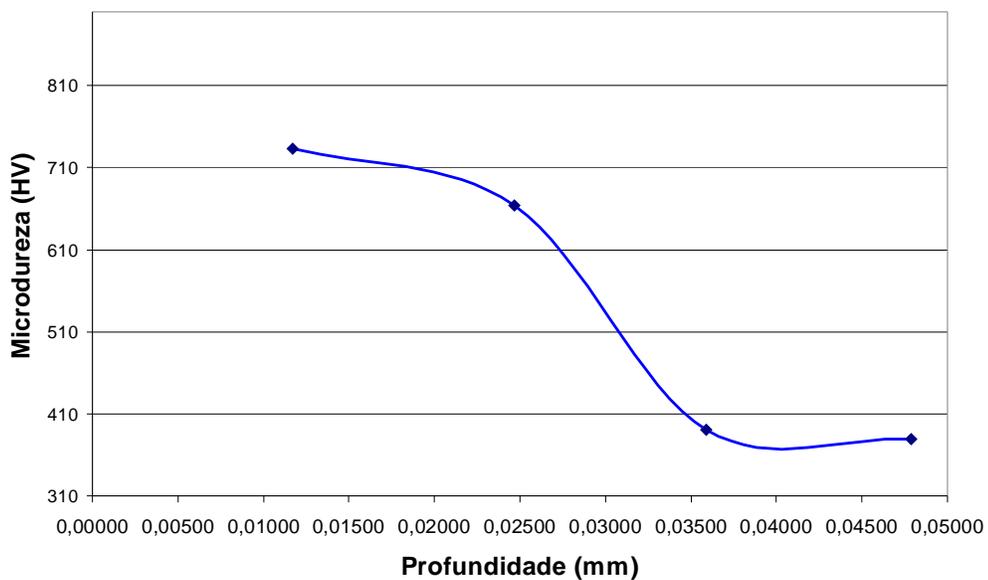


FIGURA 70 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 416

Microdureza da CAC Furo 464*FIGURA 71 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 464***Microdureza da CAC F480***FIGURA 72 - ANÁLISE DE MICRODUREZA FURO 480*

ANEXO VI

Análises de Imagens (CAC)

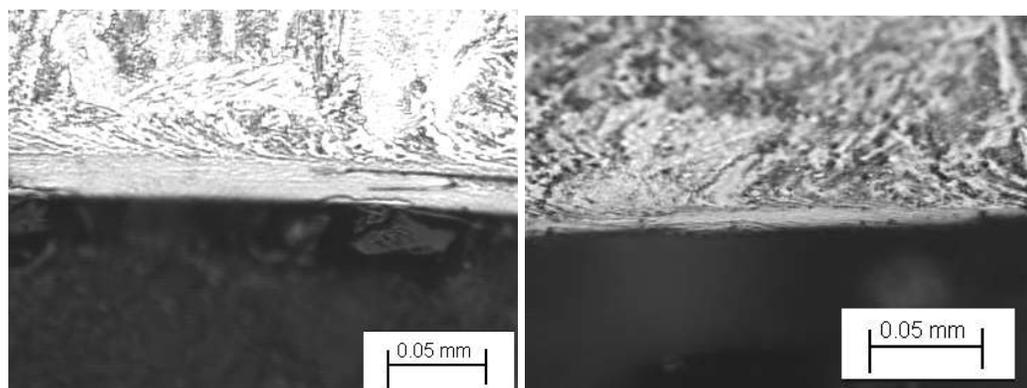


FIGURA 73 - FUROS 16 E 32 RESPECTIVAMENTE

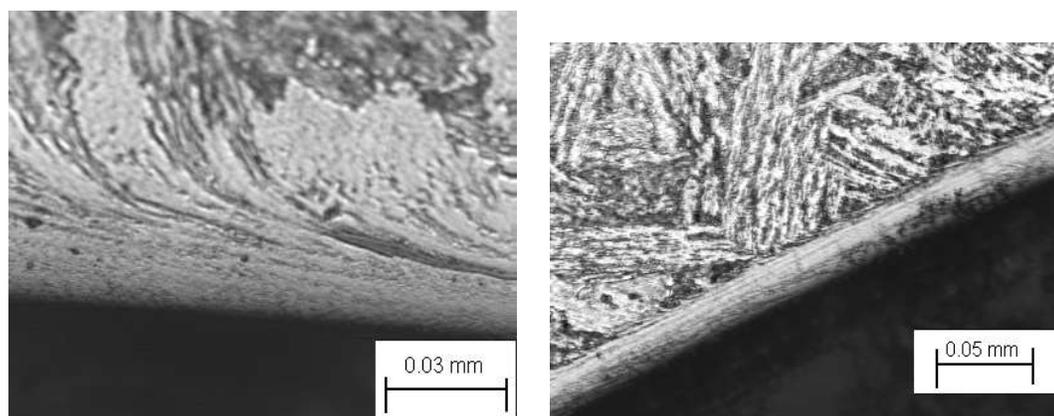


FIGURA 74 - FUROS 48 E 64 RESPECTIVAMENTE

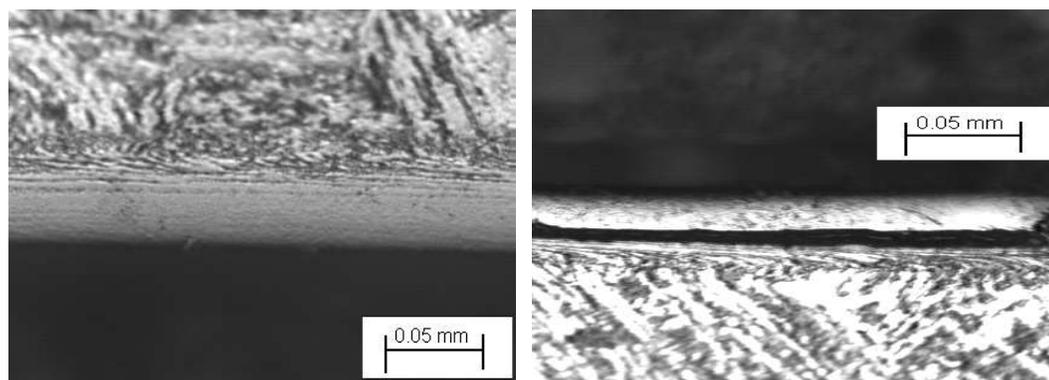


FIGURA 75 - FUROS 80 E 96 RESPECTIVAMENTE

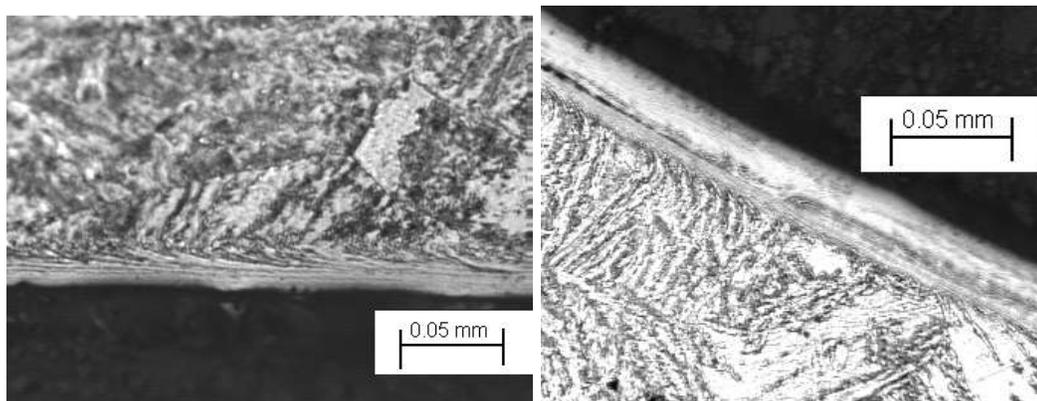


FIGURA 76 - FUIROS 112 E 128, RESPECTIVAMENTE

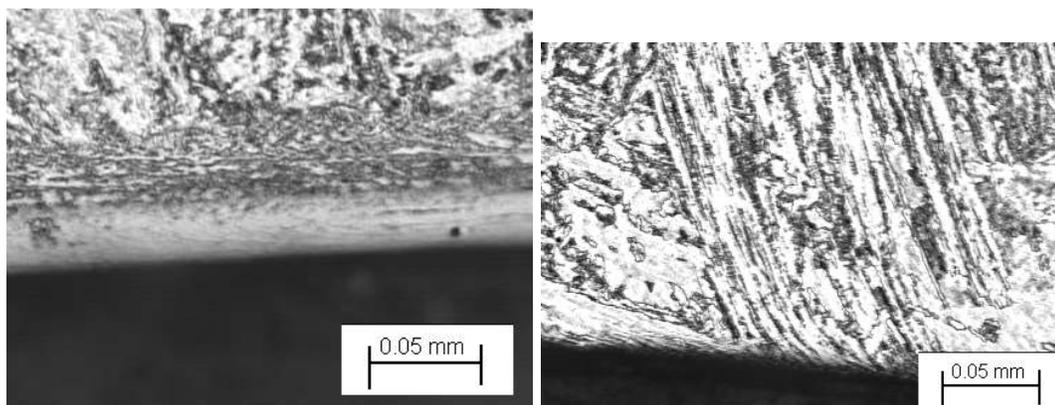


FIGURA 77 - FUIROS 144 E 160, RESPECTIVAMENTE

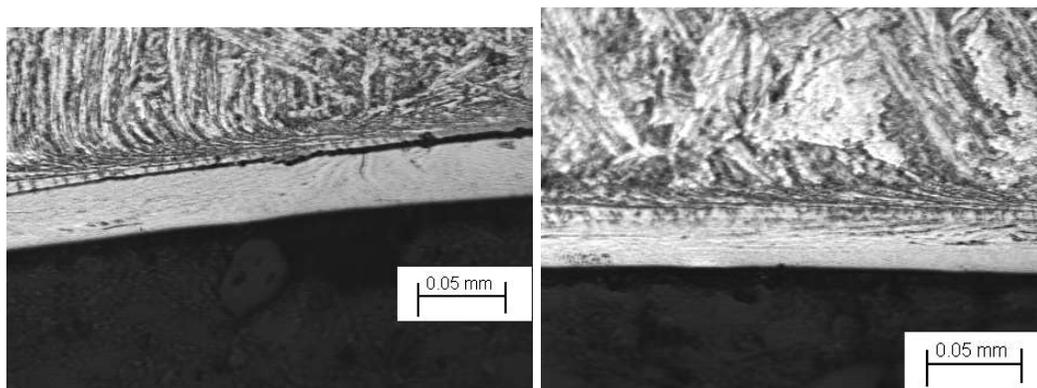


FIGURA 78 - ANEXO VI: FUIROS 176 E 192, RESPECTIVAMENTE

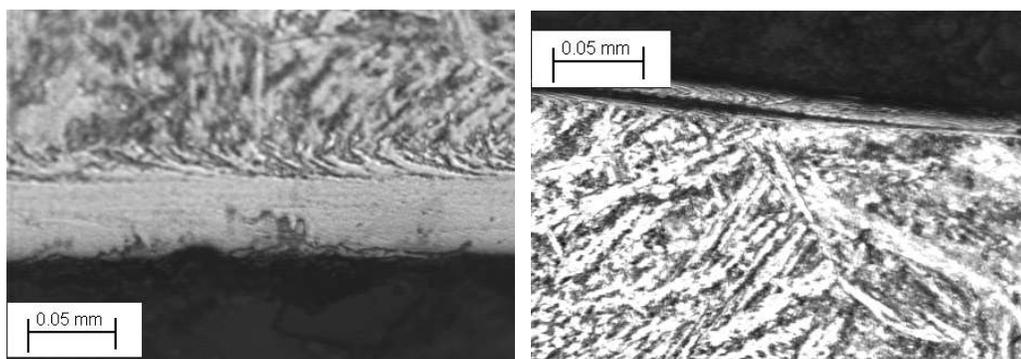


FIGURA 79 - FUROS 208 E 224, RESPECTIVAMENTE

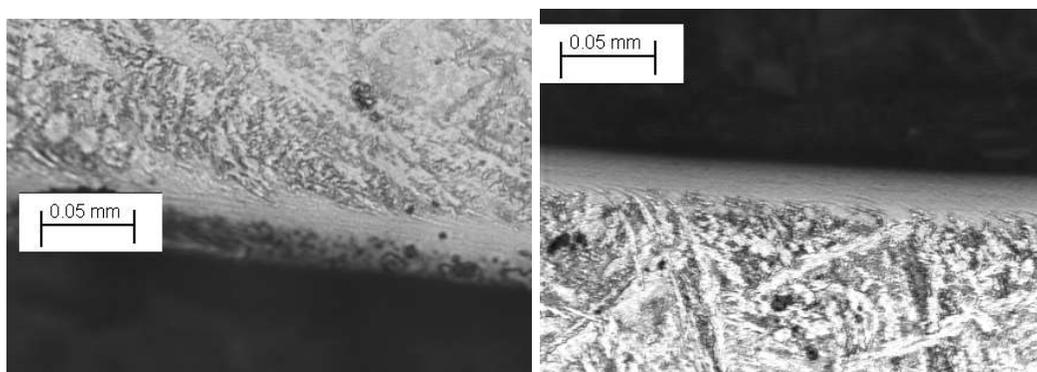


FIGURA 80 - FUROS 240 E 256, RESPECTIVAMENTE

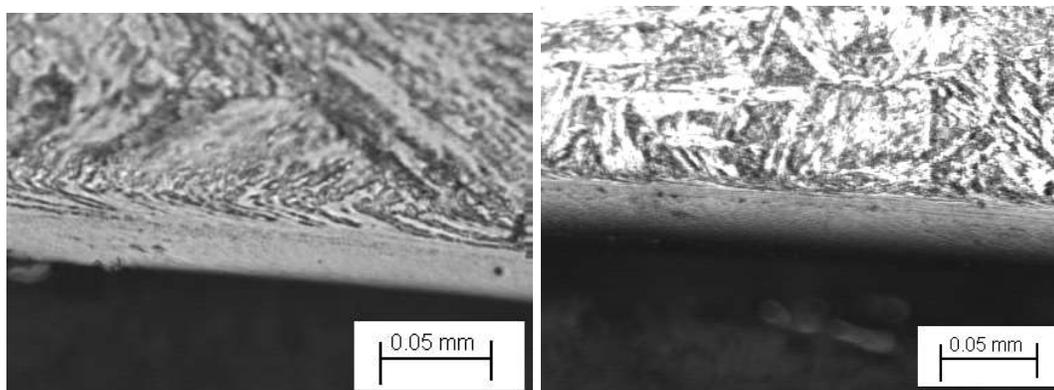


FIGURA 81 - FUROS 272 E 288, RESPECTIVAMENTE

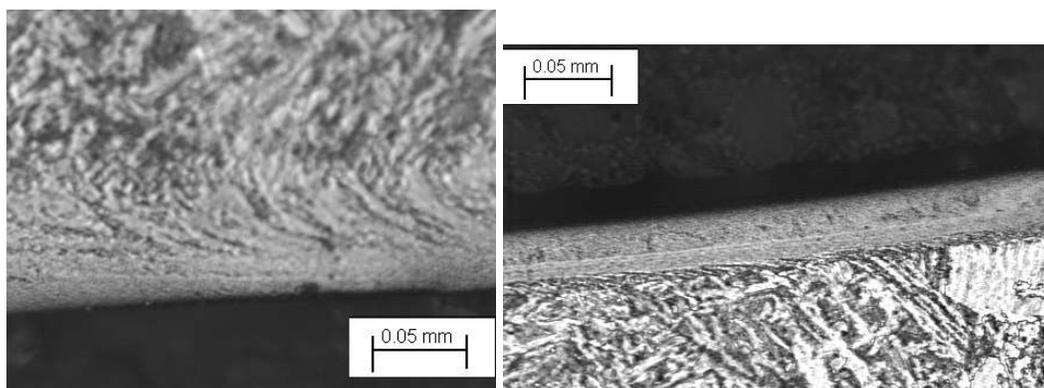


FIGURA 82 - FUROS 304 E 320, RESPECTIVAMENTE

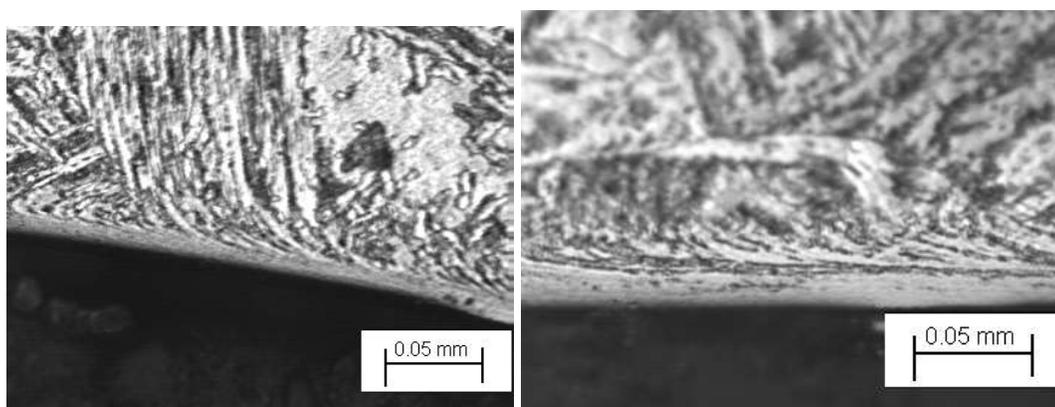


FIGURA 83 - FUROS 352 E 368, RESPECTIVAMENTE

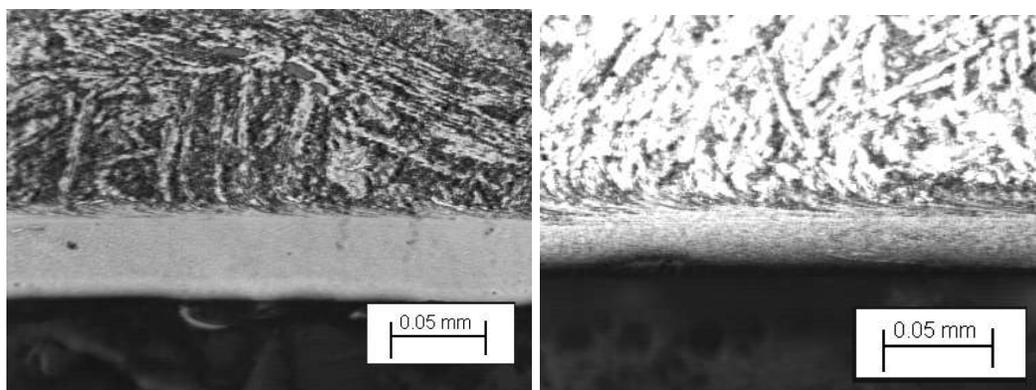


FIGURA 84 - FUROS 384 E 400, RESPECTIVAMENTE

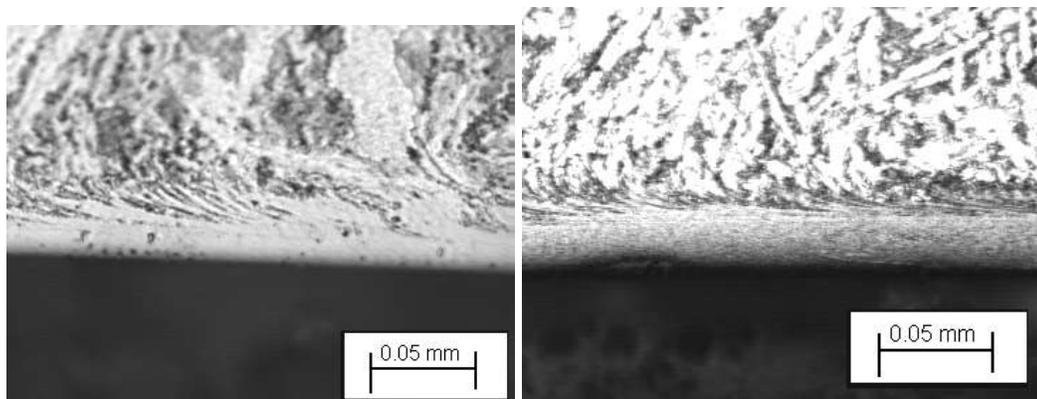


FIGURA 85 - FUROS 416 E 432, RESPECTIVAMENTE

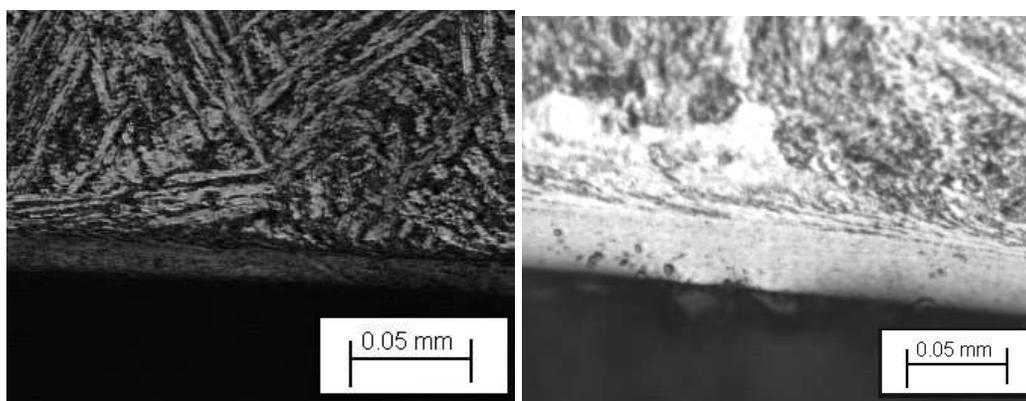


FIGURA 86 - FUROS 448 E 464, RESPECTIVAMENTE

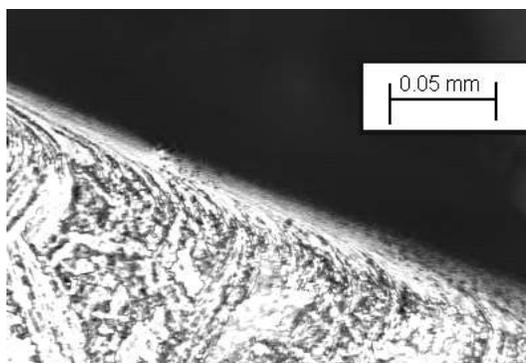


FIGURA 87 - FURO 480.