

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA/UNIMEP

FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS

CILÍNDRICAS POR MEIO DA TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO

LUIZ SERGIO GÂMBARO

ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON VIEIRA JUNIOR

SANTA BARBARA D'OESTE

2006

A

Deus, a minha esposa, meus pais e,
pessoas da minha família.

AGRADECIMENTOS

A minha família, e os amigos, e para aqueles que se fizeram presentes e incentivaram esta conquista.

Ao Prof. Milton Vieira Junior pela orientação, compreensão, e incentivo dispensado ao desenvolvimento deste trabalho, além da amizade.

A secretaria da Pós-Graduação da UNIMEP, pelo apoio, e principalmente pela amizade.

Aos técnicos de laboratório da UNIMEP, especialmente a o Sr. Ronaldo pela colaboração na realização dos ensaios.

A QUALITEC ACESSORIA E INSPEÇÃO LTDA, seu proprietário e funcionários, pelo auxílio na realização das análises.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	IX
RESUMO.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	7
2.2. DRESSAGEM	11
2.2.1. INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO	12
2.2.2. FERRAMENTAS DRESSADORA	15
2.3. LUBRI - REFRIGERAÇÃO	16
2.3.1. MECANISMOS DO FLUIDO REFRIGERANTE	17
2.3.2. FLUIDOS DE CORTE	18
2.4. NOVAS TENDÊNCIAS PARA A RETIFICAÇÃO	21
2.4.1. RETIFICAÇÃO POR CREEP-FEED	21
2.4.2. DRESSAGEM PARA CREEP-FEED	25
3. MICRO E MACRO CONSTITUINTES DE QUALIDADE (MMDQ).....	27
3.1. INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	27
3.1.1. DANOS TÉRMICOS	29
3.1.2. TENSÕES RESIDUAIS GERADAS POR RETIFICAÇÃO	30
3.2. RUGOSIDADE SUPERFICIAL	32
3.2.1. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.....	39
3.3. ENSAIO DE MICRO DUREZA E DUREZA	42
3.3.1. MICRO DUREZA VICKERS	46
3.3.2. DUREZA ROCKWELL	49
3.4. TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO	50
3.4.1. TRATAMENTO TÉRMICO	54
3.4.2. FORMAÇÃO DA MARTENSITA	55
4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL.....	57
4.1. DEFINIÇÃO DO CICLO DE OTIMIZAÇÃO.....	61
5. DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	62
5.1. MATERIAIS E CORPO DE PROVA.....	62
5.2. USINAGEM DO CORPO DE PROVA.....	62
5.3. MAQUINA DE ENSAIO E REBOLO.....	64
5.4. CICLO DE TÊMPERA.....	65
5.5. ENSAIOS DE DUREZA.....	66
5.5.1. ANÁLISE DA DUREZA SUPERFICIAL (HRC).....	66

5.5.2.	ANÁLISE DA MICRO DUREZA (MV).....	67
5.6.	ANÁLISE DA RUGOSIDADE Ra (μm).....	69
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
6.1.	DUREZA SUPERFICIAL.....	70
6.2.	RUGOSIDADE SUPERFICIAL.....	73
6.3.	MICRO DUREZA.....	78
6.4.	ESTRUTURA TRANSFORMADA.....	86
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	95
	ANEXOS.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ap	Profundidade de corte
Asd	Àrea de dressagem.
b	Largura de ataque.
bd	Largura de atuação do dressador.
bdr	Largura real de atuação do dressador.
CNC	Comando Numérico Computadorizado.
d_{eq}	diâmetro equivalente.
Dw	Diâmetro da peça.
f	Velocidade de avanço radial.
HK	Dureza Knoop.
HRC	Dureza Rockwell escala C.
HV	Dureza Vickers.
l_w	Comprimento de contato.
MmdQ	Macro e micro determinantes de Qualidade.
MV	Micro Dureza Vickers.
OTM	Tempera de Alta Temperatura.
Pc	Profundidade de Corte.
Rt	Rugosidade máxima.
Sd	Passo de dressagem do rebolo.
Ud	Grau de recobrimento da dressagem.
UTM	Tempera de Baixa Temperatura.
Vs	Velocidade de Corte.
WT	Ondulação teórica (macro efeito)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA NA RETIFICAÇÃO.....	3
FIGURA 2 – CINEMÁTICA DE DRESSAGEM COM DRESSADOR DE PONTA ÚNICA.....	13
FIGURA 3 – PRESSÃO X VELOCIDADE DO REFRIGERANTE.....	18
FIGURA 4 – CRESCIMENTO DO ARCO DE CONTATO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DE PASSE.....	22
FIGURA 5 – FORÇAS DE RETIFICAÇÃO ATUANDO NOS GRÃOS ABRASIVOS.....	25
FIGURA 6 – SUPERFÍCIE REAL IDENTIFICANDO DEFEITOS E ONDULAÇÕES.	37
FIGURA 7 – PERFIL REAL CORTADO NO PLANO PERPENDICULAR.....	38
FIGURA 8 – PERFIL DA RUGOSIDADE APÓS FILTRAGEM DE ONDULAÇÃO.	39
FIGURA 9 – RUGOSIDADE MÉDIA R_a	39
FIGURA 10 – ÂNGULO DA PONTA DO PENETRADOR..	45
FIGURA 11 – RELAÇÃO CARGA X DUREZA X ESPESSURA DO MATERIAL.	46
FIGURA 12 – IMPRESSÃO (A) E (B) DA MICRO DUREZA VICKERS... ..	47
FIGURA 13 – VARIAÇÃO HK E HV COM CARGA DE ENSAIO DE MICRO DUREZA.....	48
FIGURA 14 – TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO... ..	52
FIGURA 15 – ENSAIO DE RETIFICAÇÃO.....	53
FIGURA 16 – CURVA TTT AÇO AISI 4340	56
FIGURA 17 – IDENTIFICAÇÃO DA RETIFICAÇÃO DENTRO DA SEQUÊNCIA DE FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA.....	57
FIGURA 18 – FASES DA REMOÇÃO DE CAVACO NA RETIFICAÇÃO.....	58
FIGURA 19 – CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE RETIFICAÇÃO.....	64
FIGURA 20 – COMPARAÇÃO DA DUREZA HRC ENTRE PROCESSO COM E SEM EFRIGERAÇÃO.....	72
FIGURA 21 – MÉDIAS DA RUGOSIDADE DA TÊMPERA (R_a) NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.....	76
FIGURA 22 – MÉDIAS DA RUGOSIDADE APÓS O ACABAMENTO (R_a) NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.. ..	77
FIGURA 24 – IMPRESSÃO MICRO VIKERS E DIAGONAL (D).....	78
FIGURA 24 – IMPRESSÃO MICRO VICKERS	79
FIGURA 25 – MÉDIAS DE MICRO DUREZA NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.....	83
FIGURA 26 – MÉDIAS DE MICRO DUREZA NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.....	85

FIGURA 27 – ESTRUTURA DO CORPO DE PROVA PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO.....	86
FIGURA 28 – ESTRUTURA DO CORPO DE PROVA PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO.....	87
FIGURA 29 – CAMADA EFETIVA RHT PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO	88
FIGURA 30 – CAMADA EFETIVA RHT PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – NÚMERO DE CLASSE DE RUGOSIDADE R_a PARA SUPERFÍCIES.....	40
TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DE R_a (μm) SEGUNDO O PROCESSO DE FABRICAÇÃO..	41
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE DUREZA..	50
TABELA 4 – PORCENTAGENS DE ELEMENTOS DE LIGA NO AÇO 4340	62
TABELA 5 – RUGOSIDADE MÉDIA R_a (μm) PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO CICLO DE TEMPERA.....	73
TABELA 6 – RUGOSIDADE MÉDIA R_a (μm) PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO CICLO DE TEMPERA..	74
TABELA 7– RUGOSIDADE MÉDIA R_a (μm) PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO E ACABAMENTO FINAL.....	75
TABELA 8 – RUGOSIDADE MÉDIA R_a (μm) PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO E CABAMENTO FINAL..	75
TABELA 9 – MICRO DUREZAS MÉDIAS CORPOS DE PROVA COM REFRIGERAÇÃO....	80
TABELA 10 – MICRO DUREZAS MÉDIAS CORPOS DE PROVA SEM REFRIGERAÇÃO...81	
TABELA 11 –VALORES MÉDIOS DA MICRO DUREZA X PROFUNDIDADE EM (MM).....	82

Gâmbaro, Luiz Sergio, **PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS CILÍNDRICAS POR MEIO DA TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO, 2006**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Urbanismo e Arquitetura, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

RESUMO

Na fabricação de peças de aço ABNT 4340 é comum a execução da usinagem do material ainda macio (sem têmpera), sendo o endurecimento executado posteriormente (por meio do tratamento térmico de têmpera), e finalizando com uma fase de retificação para correção de desvios e alívio de tensões. Essas fases dos processos são, geralmente, realizadas em separado e em locais diferentes. Isto provoca perda de flexibilidade do processo, aumenta os tempos de produção, causa desvantagens de logística, aumentando os custos de produção por consequência. A “Proposta de Otimização de Processos de Fabricação de Peças Cilíndricas por Meio da Têmpera por Retificação”, apresentada no presente trabalho, busca promover a integração do processo endurecimento e acabamento em uma única fase, durante o processo de retificação. A energia gerada pelo atrito do par rebolo peça induz à transformação de fase martensítica do aço ABNT 4340 durante a operação de retificação, provocando o endurecimento de uma camada superficial. Como este processo ainda não é aplicado no ramo industrial, este trabalho avalia os micro e macro determinantes de qualidade (MmdQ) sob duas condições distintas de processo: com aplicação de refrigeração e sem refrigeração.

PALAVRAS-CHAVE: Têmpera por Retificação, micro e macro determinantes de qualidade, estrutura martensítica.

Gâmbaro, Luiz Sergio, **PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS CILÍNDRICAS POR MEIO DA TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO**, “*Proposal of Optimization of Production Processes of Cylindrical Pieces by means of the Grind Hardening*”, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’ Oeste.

ABSTRACT

In the production of pieces of steel ABNT 4340, usually the work is machined non-hardened, being its hardening executed with a thermal treatment of tempering, and with the finalization in the grinding process, where form deviations and stress are corrected. These processes are separate and accomplished at different places. This causes a reduction of flexibility of the process, increases the times of production, and causes logistics disadvantages, increasing the production costs. The “Proposal of Optimization of Production Processes of Cylindrical Pieces by means of the Grind Hardening”, is to promote the integration of the hardening and finishing processes in only one grinding phase. The energy generated by the pair wheel-work induces the martensitic transformation of phases of steel ABNT 4340 during the grinding operation. As this process is not still applied in the industrial branch, this work evaluates the micro and macro determinants of quality (MmdQ) under two different conditions of process: with application of coolant and without coolant.

Keywords: Grind hardening, micro and macro determinants of quality, martensitic structure.

1. INTRODUÇÃO

O processo de retificação é um processo de usinagem de precisão, muito utilizado nas indústrias de fabricação e que, nas últimas décadas, obteve grande desenvolvimento tecnológico devido à utilização de novos compostos cerâmicos para o rebolo, novas máquinas ferramenta e também na utilização deste processo na substituição de outras operações, e não apenas de retificação.

A retificação tem seus objetivos principais de manutenção dos níveis de qualidade geométrica dimensional e superficial a peça, mantendo a integridade física do material, isto é, não causando estados críticos de tensão e danos térmicos, com o objetivo de obtenção de maior vida da peça ou componente (MALKIN, 1989).

A retificação é um dos processos de usinagem existentes mais complexos pois envolve uma gama de parâmetros e variáveis que podem facilmente influenciar no processo (BIANCHI *et al*, 2003).

Isto ocorre porque este processo não é dependente apenas das máquinas e ferramentas, mas também da capacidade e habilidade da mão de obra que, na maioria das vezes, desconhece os inúmeros fatores envolvidos neste processo (OLIVEIRA, 2001).

A otimização de um processo demanda alto conhecimento do mesmo, principalmente no que diz respeito às relações dos parâmetros de entrada com as características de saída (DINIZ *et al*, 2003).

Não obstante, indústrias, principalmente a metal mecânica e de autopeças, reconhecem falta de treinamento especializado no assunto. Por outro lado, não cumprem seu papel porque envolvem custos que são dependências de tempos de treinamentos, tempos improdutivos, e principalmente na aquisição de

máquinas de maior precisão, e ferramentas rebolos com novos compostos materiais, elevando os custos do produto final (OLIVEIRA, 2001).

Grandes variedades de peças e produtos não necessitam mais passar por operações de usinagem convencional, caminhando diretamente para o processo de retificação, que é o acabamento final requerido em qualidade geométrica superficial e dimensional. Assim, o tempo médio de fabricação por retificação de alguns componentes chega a 20% dos tempos totais de usinagem do mesmo, importando à retificação a maior relevância (OLIVEIRA *apud* GHENIS 2001).

Entretanto, o sucesso da retificação não está apenas concentrado no rebole, mas também no desenvolvimento de novas máquinas de retificação, construídas com motores e eixos para transmissão com altas potências de usinagem. Da mesma forma, o projeto de novos suportes, barramentos, mesas e eixos de alta rigidez contribuem para a melhor performance do equipamento (WETKÄMPER *et al*, 1996).

Para os sistemas de refrigeração, o desenvolvimento de novos refrigerantes, que também atuam como lubrificantes, contribui para a melhoria da qualidade das superfícies retificadas (MALKIN, 1989).

Abrão (1991) pesquisou os gradientes de temperatura na região de contato entre a ferramenta e peça, visto que a temperatura nesta região pode atingir níveis superiores à 1000° C. Da mesma forma, Silva (2000) constatou que, para determinadas condições de usinagem, o teor do óleo mineral no fluido de corte reduz a força de corte no sentido tangencial, reduzindo a temperatura de corte.

O domínio do processo de têmpera-retificação não é apenas a observação de interligações entre grandezas de entrada, mas, também, das grandezas

derivadas do processo como as estabelecidas na Figura 1, (BRINKSMEIER *et al*, 2001).

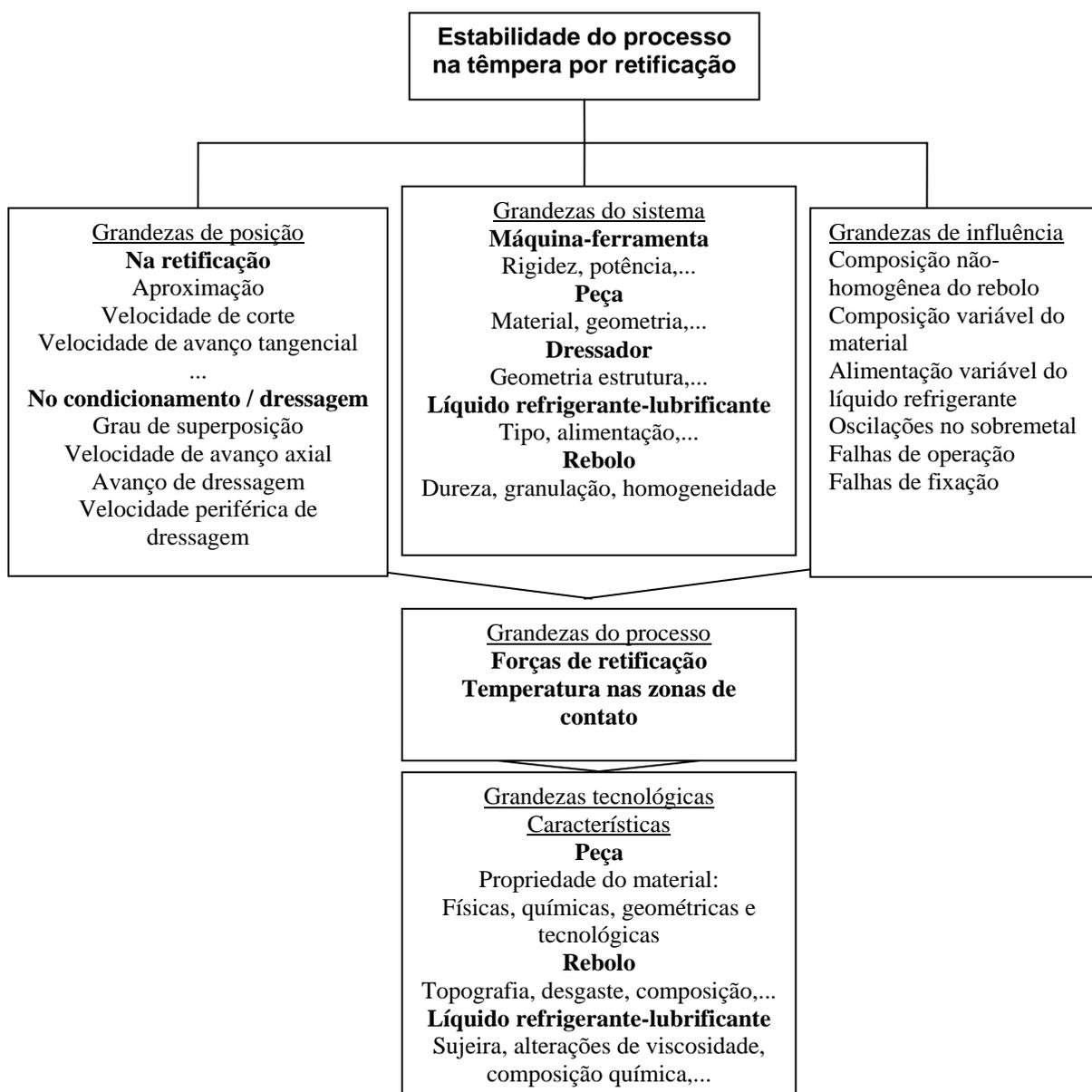


FIGURA 1 – GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA NA RETIFICA O

FONTE. (BRINKSMEIER *et al*, 2001)

Novos sistemas de filtração do refrigerante foram desenvolvidos e implantados. Os sistemas atuais operam com altas vazões e altas pressões de refrigerante, contribuindo, assim, para a não ocorrência do dano térmico, mantendo a integridade da superfície, auxiliando na remoção do cavaco dos interstícios dos grãos do rebolo. Modernas máquinas são dotadas também de sistemas integrados de balanceamento do rebolo, conferindo ao sistema maior precisão na qualidade superficial e tolerâncias geométricas (MALKIN, 1989).

Os problemas de retificação na indústria dividem-se basicamente em três grandes grupos: a falta de dados consistentes para especificação de uma nova operação; a inconsistência de uma operação já especificada que passa a não fornecer mais qualidades desejadas; e a falta de dados e experiências para a aplicação de novas tecnologias (OLIVEIRA, 2001).

Desta forma, o presente trabalho pretende analisar a partir de resultados experimentais obtidos pelo processo de têmpera por retificação sem refrigeração e com refrigeração, a possibilidade de otimização deste processo com parâmetros de usinagem, e o comportamento dos MmdQ, em função dos valores obtidos.

Segundo Chiaverini (1981) a têmpera superficial consiste em produzir-se uma têmpera localizada apenas na superfície do aço, que assim adquirirá as propriedades e características típicas da estrutura martensítica. Vários são os motivos que determinam a preferência da têmpera superficial em relação à têmpera total:

- > obtenção de superfícies duras e resistentes ao desgaste em peças de aço que, face às suas dimensões ou às tolerâncias dimensionais exigidas, seria impossível endurecer convenientemente através de toda a secção;
- > obtenção de propriedades superficiais que não seriam indicadas para a secção inteira das peças;

> finalmente, obtenção de combinação de altas resistências ao desgaste e dureza na superfície com suficiente ductilidade e tenacidade no núcleo das peças.

Pretende se, também, analisar as dificuldades ocorridas durante o experimento, pois possíveis ajustes e fatores do sistema alteram o comportamento dos MmdQ devido a solicitações térmicas do par rebolo e peça se os mesmos não forem corretamente especificados (BRINKSMEIER, *et al*, 2001).

Assim, a têmpera superficial por retificação, apresenta outras vantagens, como a não exigência de fornos de aquecimento, é mais rápida que a têmpera convencional, pode ser realizada na própria máquina de retificação. Este processo poderá ser aplicado na otimização do processo de fabricação de peças cilíndricas com uso do ciclo de têmpera e acabamento por retificação.

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

1.1. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

Cap 1 – Introdução: Descrição sucinta dos processos de têmpera e retificação.

Cap 2 – Revisão da Literatura: este capítulo traz um resumo do processo de retificação, desde o seu surgimento, até os dias atuais, as novas tecnologias, os métodos de preparação do rebolo e novos materiais empregados neste processo.

Cap 3 – Descreve, de forma sucinta, os Micro e Macro Determinantes de Qualidade (MmdQ que estão relacionados com o processo de têmpera por retificação, principalmente aqueles que serão objeto de estudo deste trabalho.

Cap 4 – Proposta de Trabalho: neste capítulo, procura-se, de forma breve, definir a metodologia e os pontos almejados por este trabalho.

Cap 5 – Materiais e Métodos: este capítulo traz a descrição dos materiais e equipamentos empregados para a realização do ensaio, bem como os métodos empregados para análise dos resultados obtidos durante os experimentos.

Cap 6 – Resultados e Discussão: neste capítulo, expõem-se os resultados das análises desenvolvidas sobre os MmdQ.

Cap 7 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.

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

2. REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e aborda conceitos sobre o processo de retificação. Apresenta, também, uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia do processo que é importante para compreensão do trabalho proposto.

2.1. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Retificação é um processo de usinagem mecânica onde a remoção de cavaco do material é estabelecida pelo contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva (rebolo), que gira em alta rotação, enquanto que a peça tem uma velocidade menor. A retificação é também um método versátil de remoção mecânica de material que confere à peça alta precisão geométrica e dimensional (MALKIN, 1989).

De acordo com Souza (1980), o processo de retificação talvez seja um dos mais antigos em existência, que teve início ainda com o homem da pré-história, que produzia e afiava as ferramentas esfregando-as nas pedras.

Retificação é o principal processo industrial dos últimos tempos, e corresponde entre 20% a 25% das despesas totais em operações realizadas por máquinas ferramentas nos países industrializados. A sociedade atual estaria impossibilitada de produzir sem a retificação, pois, aquilo que é usado passou por um processo de retificação, ou por uma máquina que sofreu uma operação de retificação (MALKIN, 1989).

Na maioria de vezes, este processo é empregado como operação final da fabricação de uma peça e, apesar de parecer uma operação simples, requer domínio dos parâmetros de velocidade de corte, velocidade de avanço, boa

refrigeração e controle dimensional rigoroso. O processo de retificação, apesar de ser muito empregado na indústria, ainda não é totalmente dominado como outros processos de usinagem, como aqueles em que a ferramenta tem uma geometria de corte bem definida, e devido à alta complexidade envolvida no processo (OLIVEIRA e PURQUERIO, 1989).

O rebolo com multiplicidade de arestas de corte e geometria não uniforme, variações de profundidade de corte em cada grão, altas temperaturas, esforços e parâmetros de corte não fáceis de serem controlados, produzem deformações plásticas que dificultam o entendimento e a otimização desse processo (OLIVEIRA e PURQUÉRIO, 1989).

O processo de retificação é um processo onde as taxas de remoção de cavaco são muito baixas se comparadas a outros processos, mas isso ocorre devido à qualidade das tolerâncias que podem ser obtidas com este processo. A tolerância dimensional situa-se entre IT4 e IT6 e a rugosidade da superfície R_a pode variar de 0,02 a 1,6 μm (MALKIN, 1989).

As tolerâncias e rugosidades obtidas estão relacionadas diretamente com outros fatores que são fundamentais no processo, tais como a granulometria e velocidade do rebolo, a velocidade de avanço, a profundidade de corte, o sistema de refrigeração e os componentes mecânicos da própria máquina, a retificadora (OLIVEIRA e PURQUÉRIO, 1989).

Por muito tempo, o processo de retificação era o único processo a ser empregado em peças endurecidas por tratamentos térmicos ou deposição de camadas duras e superficiais. Acabamentos em peças de revolução podem ser conseguidos por outros processos, como torneamento, visto que surgiram novos materiais para as ferramentas, tais como as ferramentas de material cerâmico e as ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN). Com ferramentas apropriadas e máquinas CNC consegue-se, atualmente, acabamentos na casa de IT 5 (DOSTAL *apud* GOMES, 1992).

Da mesma forma ocorreu o desenvolvimento da tecnologia da retificação com o surgimento de novos materiais para o rebolo, no caso o CBN. Também a máquina retífica, recebeu melhorias no projeto e melhorias dos componentes mecânicos, como a utilização de mancais e guias hidrostáticas, mecanismos de compensação de deformação térmica e controles computadorizados (CNC). Desta maneira, em alguns caso consegue-se alcançar tolerâncias na casa de IT 4, ou até mesmo menor (DOSTAL *apud* GOMES, 1992).

Com o desenvolvimento de novos materiais e equipamentos as velocidades de retificação puderam ser aumentadas. Um rebolo de 65,0 mm de diâmetro pode atingir uma velocidade de 204 m/s, isto porque máquinas e rebolos são projetados para operarem eficientemente nesta velocidade (WESTKÂMPER, 1998).

Com o objetivo de aumentar a produtividade de diversos métodos de retifica, inclusive a cilíndrica, a velocidade periférica do rebolo aumentou para um nível substancialmente mais alto do que os processos com rebolos e máquinas ferramentas convencionais. As retificações em altas velocidade, (*high speed*) é empregada principalmente quando é necessário menor grau de rugosidade (WESTKÂMPER, 1998).

Para se conseguir altas velocidades, as retificadoras também passaram por inovações tecnológicas, sendo construídas com alta rigidez dinâmica e estática, equipadas com motores mais potentes, eixos e rolamentos extrafortes, protetores para rebolos mais resistentes e operando com alta precisão dimensional. Para retificação em altas velocidades emprega-se fusos com mancais magnéticos ativos que não têm nenhum contato mecânico (WESTKÂMPER e KLYK, 1998).

Por outro lado, novos rebolos foram desenvolvidos e testados expressamente para operar em alta velocidade, com taxa maior de remoção do cavaco, menor

consumo de energia e menor produção de calor entre as faces de contato, peça e rebolo, diminuindo embora que em pequeno percentual as queimas de retificação, conferindo ao produto maior qualidade e precisão (WESTKÄMPER e KLYK, 1998).

O processo de retificação tornou-se muito importante nos sistemas produtivos, pois fabricantes e revendedores de produtos abrasivos que dominam o mercado consumidor fornecem aos seus clientes, treinamentos especializados quanto à utilização dos rebolos abrasivos e suas aplicações (OLIVEIRA, 2001).

Há desconhecimento técnico, na maioria das vezes, na especificação correta do rebolo para a execução do trabalho de acordo com o material a ser retificado, a rugosidade desejada na superfície da peça, a velocidade necessária e refrigeração (OLIVEIRA, 2001).

Da mesma forma, novos recursos para retificação continuam a ser pesquisados dando origem à têmpera por retificação. A têmpera por retificação é um processo de têmpera superficial obtido por retificação, onde o processo de formação de cavaco e de fricção na área entre a peça e o rebolo leva à transformação martensítica da estrutura da peça. Este assunto será abordado nos próximos capítulos (BRINKSMEIR *et al*, 2001).

Segundo Brinksmeir *et al*, (2001), os processos de retificação são realizados em meio a fatores do sistema, de posição e de influência, que podem se alterar e influenciar-se mutuamente. Por isso, muitas vezes não é possível determinar com precisão o ciclo do processo de uma usinagem de retificação. A chave para o domínio do processo de retificação não é apenas a observação das interligações entre as grandezas de entrada, mas também a das grandezas derivadas do processo.

Na têmpera por retificação, as forças e as temperaturas de retificação são importantes para a avaliação local e temporal das transformações térmicas e

mecânicas de energia, o que é um maio auxiliar adequado para julgar critérios de vida útil e estratégias de controle do processo. Para aços ligados podem ser obtidas estruturas martensítica superficiais de alta resistência (BRINKSMEIR *et al*, 2001).

2.2. DRESSAGEM

Durante o processo de retificação, o estudo dos fenômenos que ocorrem durante a formação de cavaco é muito importante. A ferramenta rebolo tem uma grande complexidade devido ao grande número de arestas de corte que diferem na forma e na profundidade de corte.

Antes do processo de retificação, é importante a operação de dressagem do rebolo. A operação de dressagem também é conhecida como diamantação, ou seja, afiação ou retificação do rebolo. Dependendo da forma de como a dressagem é executada, esta influi diretamente no acabamento, no volume de arranque do material, na tolerância geométrica do perfil retificado, bem como na vida útil do rebolo (OLIVEIRA, 2001).

A operação de dressagem do rebolo tem como características principais:

- Restaurar a capacidade de corte, permitindo que os grãos novos e afiados aflorem na superfície, melhorando a agressividade da face de trabalho;
- Eliminar da superfície do rebolo partículas de material do processo anterior;
- Perfilar a face do rebolo para obtenção do acabamento desejado;
- Restabelecer o perfil inicial do rebolo quando o mesmo não possui o perfil inicial;
- Oferecer concentricidade entre a face de trabalho e o eixo de rotação.

Oliveira, (1989), em sua tese de doutorado, relata que a grande influência que as condições de dressagem podem provocar no desempenho de uma operação de retificação fez com que a quantidade de pesquisas nesta área sofresse um considerável aumento por volta dos anos de 1980”.

Da mesma forma Vieira, (1992), descreve que a dressagem pode ser entendida como sendo a recuperação da capacidade de corte do rebolo. Essa recuperação se dá a partir de dois tipos de ações diferentes do dressador sobre o grão abrasivo: primeiro, o arranque do abrasivo desgastado, com pequeno volume e baixa ancoragem, e segundo a fratura do grão abrasivo que ainda tem boa ancoragem, formando, assim, novas arestas cortantes do grão abrasivo.

Para condições ideais de trabalho, um rebolo deveria ser auto afiável, quer dizer, à medida que os grãos desaparecem ou são desgastados, deveriam aparecer novos grãos ou novas faces de cortes, dando continuidade na operação. Mas, na prática, esta forma de apresentação não funciona, porque desta maneira os rebolos perderiam um grande volume dimensional em pouco tempo durante o processo de retificação (OLIVEIRA, 2001).

2.2.1. INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO

Diversos trabalhos que analisam comparativamente a influência do tipo de dressagem no desempenho da retificação têm sido publicados. Os resultados apresentados neste tipo de trabalho normalmente são qualitativos, não levando em conta as peculiaridades de cada processo. Estes resultados poderiam ser diferentes se as condições para cada tipo de dressagem fossem modificadas (OLIVEIRA, 2001).

Segundo Oliveira (1988), se ocorrer variações nas condições de dressagens utilizadas, os resultados serão diferentes dos obtidos, devido ao chamado macro efeito de dressagem, causado pelo formato do dressador e pelas

condições de dressagem. Constantemente são levadas em consideração como variáveis do processo, a profundidade de dressagem (ad) e o passo de dressagem (Sd).

Todos os resultados mostram que a agressividade do rebolo aumenta de acordo com o aumento do passo e da profundidade de dressagem. Desta forma ocorrem dois fenômenos nas operações de dressagem que são chamados de micro efeitos e macro efeitos (OLIVEIRA e PURQUERIO, 1986).

O macro efeito é causado pela forma geométrica do dressador e também pelas condições de dressagem. Ocorre que, na dressagem, os grãos do rebolo são cortados e fraturados pelo dressador, e a somatória de movimentos entre dressador e rebolo, forma uma espécie de rosca na superfície do rebolo onde as arestas dos grãos estão situadas (OLIVEIRA, 2001).

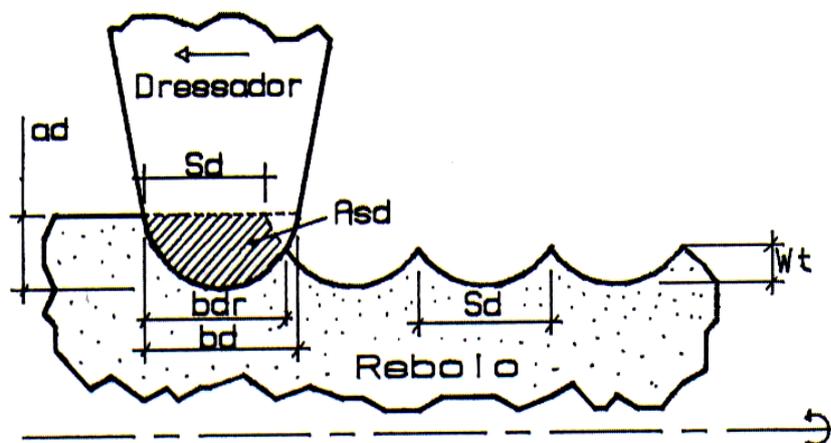


FIGURA 2 – CINEMÁTICA DE DRESSAGEM COM DRESSADOR DE PONTA ÚNICA

FONTE: (OLIVEIRA, 2001)

O micro efeito ocorre quando acontece a fratura das partículas dos grãos, ou seja, novas arestas de corte são formadas pelo dressador. A formação de arestas mais agressivas depende também da friabilidade do grão, e também das condições de dressagem. Se acaso ocorrerem em vários contatos entre as

arestas do mesmo grão e rebolo, as arestas se tornarão menos proeminentes, tornando o rebolo menos agressivo (OLIVEIRA 2001).

Isto fica também evidente quando da dressagem fina (com a_d e S_d pequenos), em que partículas muito pequenas são removidas ou fraturadas, gerando novos planos nas superfícies de corte, tornando o rebolo menos agressivo. Na execução de uma dressagem grossa (a_d e S_d grandes), tanto o micro efeito, quanto o macro efeito, apresentam caráter agressivo (OLIVEIRA, 1988).

Nas dressagens finas, o macro efeito não aparece, e a ação pouco agressiva do micro efeito é a que prevalece. Desta forma, fica evidente o aumento da taxa de remoção de material por um rebolo quando se aumenta o passo e a profundidade de dressagem (OLIVEIRA, 1988).

No processo de dressagem, existem outras variáveis a serem consideradas, como a profundidade de dressamento (a_d), e o avanço do dressador (S_d). Deve ser considerado também que o tipo de topografia gerada no rebolo depende das características geométricas do dressador, que por sua vez influencia a largura de atuação (b_d) (OLIVEIRA, 2001).

Da mesma forma, o tamanho de b_d , depende diretamente da profundidade de dressamento utilizada que é (a_d). Existe, portanto, a proporcionalidade, que implica em: quanto maior for (a_d), maior será (b_d). A grandeza na cinemática do dressamento é a relação que existe entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o avanço por volta (S_d), que gera o grau de recobrimento (U_d), da na equação 1 (OLIVEIRA, 2001).

$$U_d = b_d / S_d \quad (1)$$

2.2.2. FERRAMENTAS DRESSADORAS

Na retificação, a superfície de corte do rebolo deve ser mantida em condição (CALLISTER, 2002).de permitir as maiores taxas de remoção de material possível e garantir um acabamento superficial satisfatório. Durante o uso do rebolo, sua eficiência vai diminuindo a cada passada devido ao desgaste e fratura dos grãos abrasivos. A dressagem pode se apresentar em duas situações: o *truing* e a dressagem real (WINTER, 2001).

Truing é a operação responsável em gerar um novo perfil do rebolo, removendo o batimento e tornando concêntrica a superfície abrasiva do rebolo com o eixo da máquina, chamado de correção macro geométrica (WINTER, 2001).

A dressagem (*dressing*) é o processo de recondicionamento do rebolo permitindo que o mesmo se torne mais agressivo. Durante a retificação as arestas cortantes dos grãos abrasivos vão se desgastando, e partículas da peça de trabalho aderem entre os grãos e poros do rebolo. (WINTER, 2001).

A dressagem remove os grãos que perderam o poder de corte, e as partículas de material que aderiram ao rebolo. Assim, ocorre correção da estrutura do rebolo para a condição de maior eficiência, expondo os grãos afiados, também chamado de correção micro geométrica (OLIVEIRA, 2001).

De acordo com a finalidade de atuação, as ferramentas dressadoras são classificadas em dressadores estáticos e dressadores rotativos. Os dressadores estáticos não são providos de movimento na direção do movimento tangencial do rebolo durante a afiação, enquanto que os rotativos, além do movimento de rotação, também possuem o movimento da velocidade tangencial do rebolo (OLIVEIRA, 2001).

2.3. LUBRI - REFRIGERAÇÃO

Os fluídos de corte podem exercer uma ou mais funções no processo de retificação. A primeira é refrigerar a ferramenta, a peça e o cavaco gerado. A segunda é lubrificar a região de contato peça e a ferramenta, reduzindo o atrito, minimizando a erosão e o desgaste, aumentando a vida útil e contribuindo para uma diminuição da geração de calor na região de corte. (MOTTA e MACHADO, 1995; MALKIN, 1989).

Segundo Nussbaum (1988) os fluídos de corte desempenham uma função muito importante no processo de retificação. Um bom líquido refrigerante ou um líquido inadequado podem fazer com que a operação seja um sucesso, ou um fracasso. A qualidade do refrigerante influirá na qualidade da peça usinada, na rugosidade, na tolerância dimensional e no custo operacional.

Bianchi (1998) relata que os fluídos de corte são considerados como agentes externos a condições de usinagem, com a função de otimização do processo através do aumento da ação lubrificante e refrigerante na região de corte. É relevante levar em consideração que qualquer que seja o fluído de corte, é importante a manutenção do mesmo em temperaturas abaixo da temperatura da peça. Os fluídos de corte como integrantes do processo de retificação, promovem a remoção de cavaco na interface peça e rebolo, diminuindo o atrito, o que é fundamental para manter a integridade da superfície peça e também do rebolo.

O emprego de fluídos de corte pode, por sua vez, ter caráter funcional ou caráter econômico. A melhoria funcional é constatada pelo melhor desempenho no mecanismo da formação de cavaco, pela facilidade de expulsão do cavaco produzido na região de corte, pela maior possibilidade de se obter as dimensões desejadas na peça (FERRARESI, 1969).

Outro fator importante a ser considerado quanto ao uso dos fluidos de corte está relacionado ao meio ambiente devido ao aumento de descarte deste líquido após produção. Também, custos de aquisição e descarte crescem permanentemente em consequência de leis mais rigorosas, ao mesmo tempo em que aumenta a consciência dos problemas ambientais, o lubrificante de refrigeração do material de processo torna-se o centro das atenções (HEISEL, 1993).

2.3.1. MECANISMOS DO FLUIDO REFRIGERANTE

Durante o processo de usinagem, aparecem fontes distintas de calor que devem ser eliminadas. Uma das fontes a ser considerada é a região onde ocorre cisalhamento e a deformação plástica do material pelo arranque do cavaco, o que afeta também o volume de cavaco. A segunda afeta também a face da ferramenta rebolo, causando a quebra dos grãos abrasivos, tornando-os, menos agressivos. A terceira fonte a ser considerada é a decorrente da fonte de calor é a adesão do material sobre os grãos abrasivos do rebolo (MALKIN, 1989).

Segundo Shaw (1994) ocorre também, deformações de caráter dimensional e também de qualidade superficial, pelo aumento da rugosidade e aumento das tensões, devido ao aumento da temperatura na superfície.

A introdução do fluido de corte nestas regiões visa a redução da fonte de calor e do atrito da interface peça-rebolo pela ação refrigerante e lubrificante do fluido. Durante a operação de arranque do cavaco da peça, forma-se uma região de temperatura mais alta (*hot-spot*) onde a remoção de calor é dificultada pelo contato da ferramenta, formando uma barreira anti-resfriamento (VIEIRA, 1999).

Assim, o resfriamento desta região depende da velocidade do refrigerante e da velocidade do rebolo que arrasta o refrigerante para a região de alta

temperatura. Desta maneira, a velocidade do refrigerante é muito importante, e para que isto ocorra, a pressão também tem que ser aumentada, o que depende também do orifício de saída do refrigerante (BIANCHI *et al*, 2004).

A Figura 3 mostra que, com o aumento da velocidade, a pressão do refrigerante na região também aumenta.

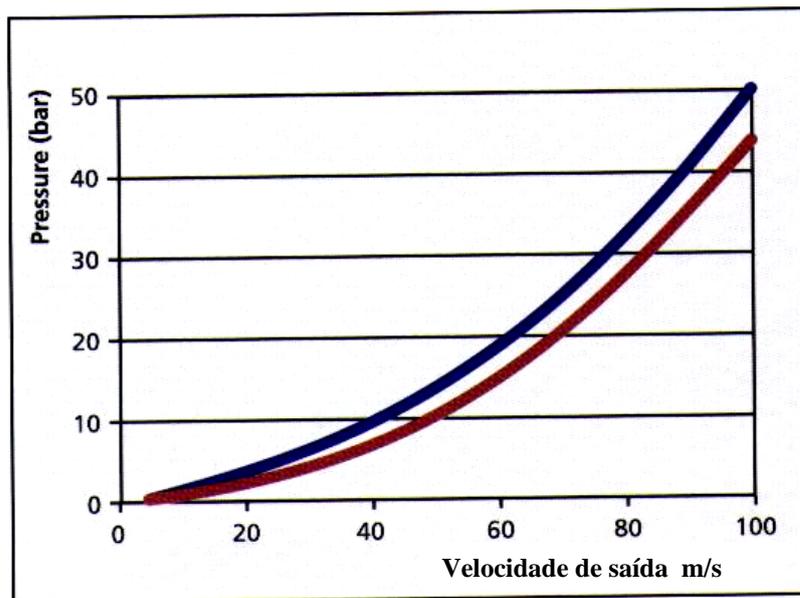


FIGURA 3 – PRESSÃO X VELOCIDADE DO REFRIGERANTE

FONTE: (ERASTEEL, 2004)

2.3.2. FLUIDOS DE CORTE

No processo de retificação, o fluido de corte pode facilitar a remoção de material atuando em dois fatores: na manutenção da afiação do rebolo através da diminuição do desgaste do topo do grão e pela manutenção da limpeza na região de corte; na diminuição do coeficiente de atrito entre grão e peça, diminuindo o calor gerado pelo deslizamento destes grãos na peça. Isso traz maior facilidade de dissipação de energia, que é gerada em menor quantidade, pelo favorecimento do corte (BIANCHI *et al*, 2004).

Os óleos de corte são empregados pela indústria de corte de metal, principalmente na refrigeração de fresas, furações profundas, enquanto que os fluidos de corte são empregados em aproximadamente 80 a 90 por cento das operações. Estes fluidos de corte podem ser sólidos, quando visar apenas à lubrificação no processo de usinagem e líquido que constituem um grupo muito maior e que podem ser divididos em outros grupos. Como há vasta gama de fluidos, este trabalho se deterá apenas nos óleos emulsionáveis e fluidos químicos, conhecidos como sintéticos ou semi-sintéticos. (BIANCHI et al, 2004).

a) ÓLEOS SOLÚVEIS

Óleos solúveis ou emulsionáveis são mistura de óleos minerais e água, fazendo com que esta mistura obtenha maior poder refrigerante em relação ao óleo puro. Estes óleos são providos de aditivos emulsificantes que permitem uma mistura melhor entre água e óleo, e agem dividindo o óleo, quebrando em partículas minúsculas, e a proporção da mistura empregada podem variar de 1:10 a 1:120, sendo a menor sempre para o óleo (FERRARESI, 1969).

A variação da mistura depende diretamente da severidade do trabalho a ser executado, sendo que, para trabalho grosseiro, maior proporção, e para trabalhos de acabamento, menor proporção da mistura. Os óleos solúveis apresentam uma desvantagem que é o baixo poder lubrificante, embora o poder refrigerante seja alto. Outra desvantagem que este óleo apresenta é quanto à durabilidade ótima para utilização devido à qualidade da água na mistura que facilita a formação de microorganismos, exalando odor característico (SILVA et al, 2004).

b) ÓLEOS EMULSIONÁVEIS DE EXTREMA PRESSÃO (EP)

Estes óleos contêm aditivos de extrema pressão, como enxofre, cloro, fósforo, gorduras e também agentes biocidas, para evitar o crescimento das bactérias

na mistura, e não devem ser tóxico, ou prejudicial ao ser humano. Os de extrema pressão (EP) são dotados de aditivos anti-fricção que aumentam as propriedades da lubrificação, e são o mesmo usado em óleos puros (BIANCHI, 2004).

Entretanto, o uso do cloro em líquidos de corte está sendo restringido, devido ao dano que causa ao meio ambiente e à saúde humana. Por esta razão foram substituídos pelo enxofre e por aditivos baseados de cálcio. Óleos extraídos de vegetais, também são empregados para melhorar as propriedades de arranque de cavaco, como no caso da retificação (FERRARESI, 1969).

c) FLUÍDOS SEMI - SINTÉTICOS

Os líquidos semi-sintéticos têm 5% a 30% do óleo mineral mais aditivos, e compostos químicos do produto que se dissolvem na água, e que dão forma a moléculas individuais chamadas de micro emulsões. A presença de uma quantidade grande de emulsificante comparada ao óleo solúvel dá a aparência mais transparente ao líquido, evitando a formação de espuma (SILVA *et al*, 2004).

Os óleos semi-sintéticos combinam algumas propriedades dos fluídos sintéticos e dos óleos emulsionáveis. As principais desvantagens são a lubrificação insuficiente em determinadas operações, bem como a formação de compostos insolúveis, quando a água utilizada no preparo da emulsão semi-sintética apresentar dureza elevada. Possuem também um melhor controle de oxidação que as emulsões convencionais (BIANCHI *et al*, 2004).

d) FLUÍDOS SINTÉTICOS

Os fluídos de corte químicos chamados de líquidos sintéticos, são desprovidos, em sua composição do óleo mineral. São formulados por

substâncias químicas que se combinam com água. Estes líquidos são constituídos de sais orgânicos e inorgânicos, biocidas, aditivos do lubrificante, entre outros, aos quais são adicionados à água. (SILVA *et al*, 2004).

Os fluídos químicos, têm uma vida mais longa do que outros líquidos, porque não são atacados por bactérias o que prolonga substancialmente a vida do fluido na máquina. Quando os líquidos sintéticos são formulados apenas com aditivos anticorrosão, a propriedade de extrema pressão (EP) é desconsiderada. De modo geral estes fluídos são indicados para uso em retificação por inibir a corrosão e por ter boa capacidade de remoção de calor gerado na interface rebolo e peça, e também por ter ação lubrificante diminui a potência de usinagem (FERRARESI, 1977).

A desvantagem deste fluído de corte é o seu baixo poder lubrificante e a formação de alguns compostos insolúveis e também a formação de espuma, principalmente quando submetido a pressões mais elevadas, dificultando o controle da operação (SILVA *et al*, 2004).

2.4. NOVAS TENDÊNCIAS PARA A RETIFICAÇÃO

2.4.1. RETIFICAÇÃO *CREEP- FEED*

O processo de retificação empregado principalmente na retificação plana tangencial no qual a velocidade de avanço é extremamente pequena e a profundidade de corte é grande denomina-se *creep-feed*. Nestas condições em que a velocidade avanço é baixa e a profundidade de corte é grande, conseguem-se altas taxas de remoção de cavaco, podendo ocorrer danos térmicos a superfície da peça devido à quantidade de energia gerada pelo processo (MALKIN, 1988).

Segundo Malkin (1988), na retificação por *creep-feed* dos aços, a energia específica excede o limite, aparecendo à queima da superfície da peça, (*burn*), que fica evidente como sendo um dano térmico. Entende-se também que a alta temperatura gerada é devido a grande profundidade de corte, e que parte desta energia, embora pequena, seja eliminada pelo cavaco removido durante o processo. De qualquer forma existe uma maneira de controlar esta temperatura, que é através do controle da profundidade de corte.

Durante a operação por *creep-feed*, o contato por atrito dos grãos abrasivos com a superfície da peça é maior, o que eleva a temperatura desta região. Devido a esta fricção entre as superfícies, são também geradas as deformações plástica e elástica da superfície, e pela distribuição de calor devido às forças de remoção do cavaco, e a possibilidade de ocorrência de trinca por fadiga é muito menor (NUSSBAUM, 1988).

Esta energia específica gerada na superfície da peça esta relacionada com o aumento do arco de contato, mesmo para pequenas profundidades de corte, porque com o aumento do arco, aumenta o comprimento do cavaco Figura 5.

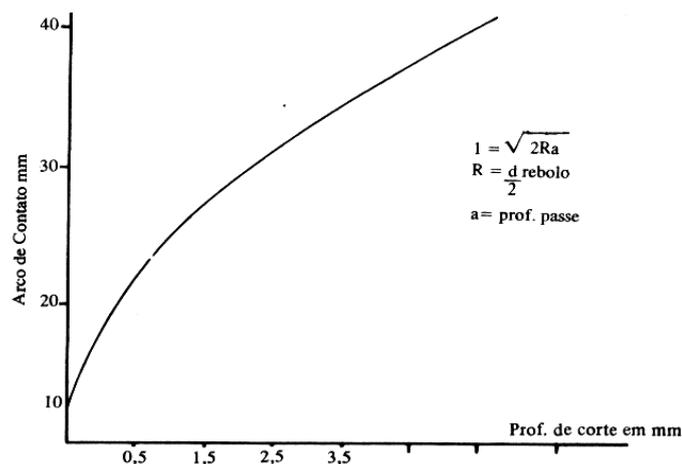


FIGURA 4– CRESCIMENTO DO ARCO DE CONTATO EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE DO PASSE.

FONTE: (NUSSBAUM, 1988)

Se por outro lado ocorrer o aumento da profundidade do passe mantendo o avanço pequeno, menor será a espessura do cavaco devido a maior quantidade de grãos abrasivos envolvidos na operação de remoção do cavaco (NUSSBAUM, 1988).

Segundo (SHIMAMUNE *et al*, 1991), a maior dificuldade no processo de retificação por *creep-feed* é a ocorrência de marcas de queima na superfície da peça devido a notável quantidade de energia na superfície da peça. Esta ocorrência pode ser controlada quando o processo for executado com parâmetros de corte baixo e também pela efetiva remoção de calor pelo fluido de corte. O emprego de rebolos de alta porosidade facilita a troca de calor entre a superfície e ferramenta, diminuindo a temperatura de trabalho da região de corte. Por outro lado, baixa velocidade de trabalho, para evitar a queima da região de retificação, causará danos na superfície de retificação.

Ocorre que, quando se trabalha em baixas velocidades, o rebolo se comportará como macio, fratura, e desprende uma quantidade maior de grãos abrasivos, que irão causar uma distorção ainda maior no perfil da peça em retificação. Porém, a baixa velocidade pode ser uma forma não correta de usinagem, mas é uma maneira de parcialmente contribuir para a não ocorrência da queima por retificação (SHIMAMUNE *et al*, 1991).

Outro fator importante na retificação por *creep-feed* é o suprimento do fluido de refrigeração, que deve ser em grande quantidade e alta pressão, aplicado diretamente na zona de alta temperatura. Embora muitas vezes exista a impossibilidade de boa refrigeração devido à complexidade da peça, a maneira de se evitar a queima é buscar outras soluções para a refrigeração, que pode ser prática e usual, mas que seja realmente eficiente (MALKIN, 1988).

Segundo (MALKIN, 1988) a eficiência do resfriamento depende do poder de resfriamento de fluido, pois na superfície aquecida se transforma em bolhas de vapor, permanecendo em movimento na superfície da peça, impedindo que

nova quantidade de fluido exerça o poder de resfriamento, como uma barreira térmica. Com o calor específico criado na zona de retificação a nucleação das bolhas de vapor ocorre a uma temperatura extremamente baixa, e a presença do filme de vapor na superfície do material, pode causar sérios danos.

Para os aços, a temperatura para ocorrência de queima da superfície é em torno de 130°C, quando da utilização de óleos solúveis em água, e aproximadamente 300°C, quando na região de alta temperatura, emprega-se óleos de corte. Assim, fica evidente que além da boa refrigeração durante o *creep-feed* a baixa velocidade de trabalho provoca uma menor distribuição de energia na superfície de contato peça-rebolo, facilitando o controle do processo e evitando danos, se controladas para ótima eficiência (SHIMAMUNE *et al*, 1991).

Segundo (MALKIN, 1978) na retificação convencional dos aços e mesmo para pequenas taxas de trabalho ocorre queima através da força tangencial de retificação, apesar da presença ou não da refrigeração. A energia de retificação, gerada pelo contato peça e rebolo poderá ser medida pela área de contato e o tempo deste contato, e certamente alcança-se o valor que determina as condições da ocorrência da queima.

Para definir qual a condição para a ocorrência da queima na retificação por *creep-feed*, é necessário definir a distribuição de energia ao longo do arco de contato e onde as forças estão localizadas. Assim quando surge uma fonte de calor, a temperatura mais alta na superfície de contato, é o local onde a energia da retificação por unidade de área é máxima. O término desta máxima energia pode ser visto na Figura 5, na qual é identificado pelo ponto (A), e o comprimento (l'), é onde o fluxo da energia de contato é máximo (SHIMAMUNE *et al*, 1990).

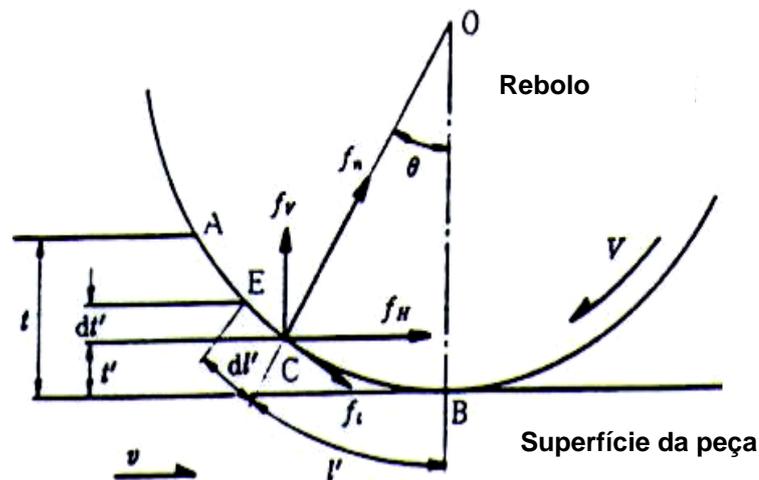


FIGURA 5 – FORÇAS DE RETIFICAÇÃO ATUANDO NOS GRÃOS ABRASIVOS

FONTE: (SHIMAMUNE *et al*, 1990)

2.4.2. DRESSAGEM PARA CREEP FEED

Na retificação por *creep-feed*, a dressagem é importante para possibilitar uma contínua remoção de material e a precisão desejada, mantendo assim afiado o reboleto. Isto pode ser explicado devido a grande quantidade de materiais que podem ser trabalhados por este processo.

O desenvolvimento de novas tecnologias ao processo de *creep-feed* com o uso de rebolos convencionais de óxido de alumínio e carboneto de silício permite altas taxas de remoção de material de forma intermitente. Embora a dressagem do reboleto possa ser realizada pelo método convencional através da ponta única de diamante ou outros dressadores, a utilizar-se de novas formas de dressamento que eliminam os tempos de preparação e dressagem do reboleto, (MALKIN, 1978).

Isso é possível porque na periferia inversa ao corte do reboleto mantém-se um rolo de diamante giratório que permite o perfilamento contínuo do reboleto,

menor que *truining*, que permite manter afiadas as arestas cortantes do rebolo. Quando a taxa de remoção de material é alta, e quando ocorre a deformação do rebolo com muita frequência. Este perfilar reduz as forças de usinagem e permite manter a mesma taxa de remoção da material durante todo o processo. Estando constantemente afiados os grãos abrasivos propagam menores quantidades de calor para o material contribuindo assim para o não aparecimento da queima por retificação, (*burn*) (BADGER *et al*, 2000).

Este método requer também um maior controle de sincronismo entre o processo de retificação e a velocidade de perfilamento contínuo do rebolo, onde as variáveis são controladas pela velocidade periférica do rebolo e velocidade da ferramenta dressadora (OLIVEIRA 2001).

A dressagem contínua pode ser empregada principalmente para as retificações de mergulho, alcançando excelentes resultados, desde que exista um meio de controle por instrumentos que permita o controle dos diâmetros envolvidos na operação (OLIVEIRA 2001).

O processo de retificação por *creep-feed*, requer maiores potências de corte da máquina, alta rigidez de todo o conjunto e, ainda, um sistema ideal automático ou inteligente para monitoramento do processo. O alto desempenho da máquina é para manutenção da precisão do posicionamento, minimização das folgas concordante ou discordante, alta rigidez dos eixos, e alta resistência estática de flexão (MALKIN, 1978).

3. MACRO E MICRO CONSTITUINTES DE QUALIDADE (MMDq)

Para garantir a qualidade da superfície temperada, e retificada, é importante conhecer a integridade superficial, a qualidade dimensional, e a rugosidade da superfície obtida durante o processo de retificação.

3.1. INTEGRIDADE SUPERFICIAL

No processo de retificação, a remoção de cavaco é realizada por inúmeras arestas cortantes que em contato com a superfície da peça geram uma grande quantidade de energia, convertida em calor e altas temperaturas. Esta temperatura, que é transferida para a superfície, é a principal fonte de danos térmicos de retificação (SHAW, 1984). Além da temperatura de retificação, o volume de refrigeração também é importante, pois dele depende o gradiente de temperatura que vai influir na integridade da superfície (JOHNSON, 1990).

A integridade superficial tem duas partes importantes a serem consideradas. A primeira está relacionada à textura superficial, e a segunda refere se a metalurgia da superfície que está relacionada com o estudo da camada superficial, e a natureza de sua formação durante o processo. Ambos os casos são importantes, pois são eles que controlam a resistência do componente ou peça (JOHNSON, 1990).

A integridade superficial pode também ser definida como a condição de alterações de uma superfície produzida por um processo mecânico ou outro qualquer. Esta superfície, depois de trabalhada, pode conter danos superficiais de natureza topográfica e também de natureza metalúrgica. As alterações das superfícies estão relacionadas à forma de remoção de cavaco e podem apresentar deformações, trincas e micro-trincas, alterações da dureza

superficial, tensões residuais na superfície, podendo chegar ao caso de fraturas intergranulares (JOHNSON, 1990).

Estudos demonstram que, tensões de origem térmicas, criadas durante o processo, são causa primária de tensões residuais elásticas (CHENG *et al*, 2000), e que as mesmas causam uma redução na vida em serviço, que se denomina corrosão sob tensão ou condições de fadiga. Na maioria dos casos, por motivos de danos térmicos, o processo de retificação deixa de utilizar taxas de retificação maiores, o que seria fundamental para o aumento da produtividade, por ser um processo simples, mas, difícil de ser controlado.

Segundo (JOHNSON, 1990), pode ocorrer também formação de uma tempera a baixa temperatura denominada de UTM, e outra de temperatura alta também conhecida como OTM, de estrutura martensítica que causa pequenas trincas superficiais, que também estão relacionadas com a integridade superficial.

Para reduzir os danos térmicos da retificação e ainda garantir a integridade superficial, é importante o controle da energia gerada durante a operação e depois transformada em calor durante o processo, que caminha para toda extensão da superfície da peça.

O controle desta energia depende de alguns elementos fundamentais que são: o rebolo, a taxa de remoção de cavaco, o volume de refrigerante e da própria superfície da peça (JOHNSON, 1990),

Para a não ocorrência de danos térmicos e garantia da integridade superficial, sem tensões residuais, é importante na retificação adotar uma quantidade de refrigerante em maior volume, um rebolo adequado para o material a ser retificado, somando-se a isto uma seleção adequada das taxas de trabalho (JOHNSON, 1990).

3.1.1. Danos Térmicos

Uma superfície é caracterizada como danificada termicamente quando durante o processo de retificação a superfície aquece demais, ou seja, passa por um processo de queima. É fácil identificar esta superfície pois, com o aquecimento aparece uma região de formação de UTM (CAMPO & KAHLES 1985).

Esta região de UTM está presente geralmente em uma camada bem superficial de retificação, pois é a região mais próxima da superfície de retificação e que apresenta as maiores taxas e danos térmicos. Esta camada de UTM, quando ensaiada, apresenta uma camada de dureza maior que o restante da superfície da peça, portanto, uma região mais sujeita à trincas (MALKIN, 1989).

Segundo Johnson (1990), as trincas superficiais são resultado do excessivo aquecimento durante o processo de retificação. A severidade das trincas pode variar, sendo que as mesmas podem não ser visível imediatamente após a retificação, tornando-se aparente algum tempo depois.

Em superfícies submetidas a elevadas tensões residuais de tração, as trincas se formam abaixo da superfície. Não aparente reduzem o limite de resistência à fadiga do material e aumenta a possibilidade da superfície do material sofrer ataque por processos corrosivos (JOHNSON, 1990).

As trincas podem ser mais evidentes quando se realiza ensaio micrográfico da superfície que, depois de preparada e atacada com nital, apresentam de forma muito clara desta região com trincas superficiais que podem ser identificadas por apresentarem uma cor branca característica (CAMPO & KAHLES, 1985).

Da mesma forma, durante o processo pode ocorrer também uma região de OTM, que também é formada devido ao aquecimento da superfície de

retificação. A superfície de OTM, por outro lado se forma, quando a taxa de calor gerada pelo par peça rebolo caminha mais lentamente para a superfície da peça, denominada como *over-tempering* (CHENG *et al*, 2000).

Na forma de preparação micrografica anterior, esta região de *overtempering* tem uma coloração mais escura, é macia, apresentando em alguns casos coloração de cinza escuro (CHENG *et al*, 2000).

De acordo com Campo & Kahles (1985), presença das regiões de OTM e UTM, mesmo quando pequenas, pode causar uma significativa redução da resistência de fadiga do componente. Pode ocorrer em regiões do componente que sofreram um calor excessivo durante a retificação, e que não apresentem trincas aparentes durante o processo de retificação, mas, apareceram depois podendo ser mesmo durante o serviço do componente.

3.1.2. TENSÕES RESIDUAIS GERADAS POR RETIFICAÇÃO

Tensões residuais em componentes metálicos podem ser induzidas por vários processos, quer sejam mecânicos ou térmicos, desde que não ocorra a mudança de forma ou volume. Para o processo de retificação, a baixa tensão residual é importante para manutenção da integridade da superfície (CHENG *et al*, 2000).

Se forem induzidas tensões residuais de compressão, a vida em fadiga será aumentada consideravelmente. Todas as tensões residuais de compressão são consideradas como benéficas nas propriedades mecânicas dos materiais, aumentando a resistência à fadiga, enquanto que as tensões de tração são prejudiciais quanto à resistência mecânica, à corrosão e ao desgaste (MALKIN, 1989).

Estas tensões residuais são produzidas pelas deformações plásticas não uniformes nas proximidades da superfície da peça. Durante o processo de retificação, as forças mecânicas dos grãos abrasivos como superfície da peça devem resultar em tensões residuais de compressão que produzem deslocamentos plásticos localizados (SNOYES *et al*, 1972).

Tensões residuais de retificação são produzidas por três efeitos: pela expansão térmica e contração durante a retificação, por transformações de fases devido às altas temperaturas, e pela deformação plástica causada pelos grãos abrasivos do rebolo. No primeiro caso, as tensões induzidas são descritas como térmica induzida e o último caso como mecanicamente-induzidas. Desta forma a combinação destes esforços gera uma tensão, cuja resultante será determinada por aquela em que o efeito seja maior (CHENG *et al*, 2000).

Segundo Malkin (1989), as tensões residuais de tração são causadas, principalmente por tensões induzidas termicamente e deformações associadas com as temperaturas de retificação e o seu gradiente, da superfície ao interior da peça. A formação de tensões térmicas induzidas, basicamente, é acompanhada por transformações de fases sólidas, as quais podem ocorrer durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, pois estes resultam em variações volumétricas, mesmo que pequenas, do componente.

Na superfície de retificação durante a remoção de material, ocorre expansão térmica da superfície da peça, e esta é mais aquecida que o restante do material, conseqüentemente, aumenta em maior volume do que a superfície mais abaixo, o centro da peça, muito mais fria, denominada como *subsurface* (SNOYES *et al*, 1972).

Acontece que o resfriamento subsequente da superfície de maior calor contrai mais do que a *subsurface*, causando uma tensão residual elástica nesta superfície. Para a ocorrência de um equilíbrio mecânico do material as tensões

de compressão deveriam também aparecer na subface do material, em magnitude maior do que o elástico (CHENG *et al*, 2000).

De qualquer maneira, sempre é possível induzir tensão residual de compressão, com a redução da quantidade de calor gerada na superfície da peça, e as tensões residuais podem ser evitadas controlando-se a temperatura de retificação. Controlar a temperatura de retificação é requisito mínimo para se obter em uma dada superfície tensões residuais de compressão, e não tensões elásticas, e a mesma pode ser alcançada pela redução da geração de calor na zona de retificação e a sua dissipação de forma muito eficiente (CHENG *et al*, 2000).

3.2. RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade de uma superfície e a direção das estrias desta rugosidade são motivadas pela ferramenta, pela velocidade de avanço e pela refrigeração do sistema. Portanto, a rugosidade é definida como o conjunto de irregularidades constituída de saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície (SOUZA, 1980).

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento de componentes mecânicos. A qualidade da superfície influi diretamente sobre a capacidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, fadiga e no atrito entre superfícies (MALKIN, 1989).

Quando uma superfície se apresenta lisa e polida, na realidade está constituída por uma infinidade de picos e vales minúsculos, estreitamente espaçados entre si, superpostos a um complexo de ondulações e comprimentos de onda de extensa variação. Cada tipo de processamento induz uma microtopografia característica, onde as singularidades presentes

podem ser analisadas, identificadas, e se necessário atribuída a cada uma das diferentes fases de fabricação (SOUZA, 1980).

A superfície desempenha um papel importante entre os corpos, principalmente onde as condições serão influenciadas pela sua microtopografia. Assim, em outras situações onde não ocorre contato entre os corpos, a textura superficial influi na ocorrência de fenômenos tais como a corrosão dos metais, qualidade de refletibilidade, aderência entre camadas de acabamento, aspecto visual de acabamento e transmissão de calor (MALKIN, 1989).

Quando duas superfícies trabalham em atrito deslizante ou com movimento relativo entre si, a qualidade da textura determina o desgaste resultante deste atrito. No processo de retificação, a rugosidade superficial pode ser controlada através dos parâmetros de entrada do processo tais como, a velocidade de avanço e de corte, e a topografia do rebolo, desde que outros elementos, como os construtivos da própria retifica, estejam satisfatórios (SOUZA, 1980).

Toda superfície de um componente de engenharia se constitui em uma fina camada, com propriedades que diferem do interior do corpo. Estas propriedades raramente se apresentam homogêneas e, através do domínio microscópico em questão, em seus diferentes estados, contribuem para esboçar o comportamento funcional de um componente (SOUZA, 1980).

De acordo com investigações realizadas por Souza (1980), baseadas em cortes normais à superfície de peças usinadas, as camadas superficiais e sub-superficiais, de peças trabalhadas em máquinas-ferramenta desenvolvem-se obedecendo a um paralelismo entre si, repetindo-se todos os acidentes e desvios. A camada superficial geralmente apresenta três zonas distintas até que se atinja o metal base em seu estado original e intacto. As camadas assim formadas se apresentam da seguinte forma:

- (I) a primeira camada, mais externa, formada pela disposição de elementos do meio ambiente, na forma de um filme de gases condensados e sólidos em suspensão com espessura de 3×10^{-7} mm.
- (II) a camada subsequente, composta de nitretos, óxidos e metal descarbonetados pela temperatura alta, desenvolvida na operação de usinagem tem sua profundidade e espessura dependente do tipo de processo empregado, podendo chegar até 8×10^{-6} mm.
- (III) apresenta a terceira camada composta normalmente de grãos deformados do metal, com carbonetos nos contornos dos grãos, como resultado da pressão e altas temperaturas geradas durante a usinagem, com espessuras aproximadas 5×10^{-3} mm.
- (IV) esta região representa transição gradual para o metal e não apresenta deformações.

A camada superficial de um dado componente deve ser sempre avaliada dentro das determinações do projeto do produto para manutenção da precisão com textura superficial dentro das tolerâncias do projeto do produto. A rugosidade de uma superfície de retificação é influenciada pela topografia do rebolo, e esta rugosidade determina a qualidade da peça, seu comportamento. Considera também a topografia do rebolo em apenas uma dimensão, considerando as distâncias entre os gumes consecutivos (L_s), o diâmetro do grão (d_k) e a largura do gume (b_r) (SATO, 1955).

De acordo com o mencionado, considera-se também que quanto maior for o diâmetro do grão, maior será a rugosidade e que se a distância entre eles e a largura do gume aumentar, a rugosidade também aumenta, (TABORGA *et al*, 2000).

Nos modelos de Sato (1952) e Yang (1956), a profundidade de corte não foi considerada. Desta forma, o modelo apresentado apenas deve ser aplicado quando no processo de retificação empregam-se pequenas profundidades de corte. A rugosidade também depende de outros parâmetros do processo, como a profundidade de trabalho (a_e), da relação (q), da velocidade de corte (v_s) e da velocidade da peça (v_w).

A rugosidade pode ser diminuída com a diminuição da velocidade da peça (v_w) e da profundidade de corte (a_e). Pode-se considerar que na medida em que a velocidade de corte (v_w), e a profundidade de corte (a_e) são diminuídas a rugosidade máxima (R_t) também diminui. Então, quando a velocidade de corte (v_s) for aumentada, a rugosidade máxima (R_t) também será menor (SHAW, 1955).

Quando se aumenta a velocidade da peça, o cavaco será mais curto e, portanto mais espesso, que leva a um aumento da rugosidade máxima (R_t). Se a profundidade de corte for aumentada, o cavaco será mais espesso e mais comprido e, conseqüentemente, a rugosidade máxima (R_t) será maior (MALKIN, 1989).

Com o aumento da velocidade de corte o cavaco produzido tem uma espessura menor. Este acontecimento depende também do d_{eq} , ou seja, do diâmetro equivalente dado pelo diâmetro da peça e pelo diâmetro do rebolo, quanto maior o d_{eq} maior o comprimento de contato (l_{cu}). Portanto, com o aumento de (d_{eq}), o cavaco é mais comprido, e conseqüentemente uma espessura menor, o que leva a produzir uma rugosidade máxima (R_t), também menor (TABORGA *et al*, 2000).

Segundo Malkin (1989), vários modelos podem ser considerados para descrever a geração da superfície ideal e sua topografia, mas a predição é apenas teórica, visto que a rugosidade da superfície depende diretamente dos parâmetros do processo de retificação. Assim, as velocidades da peça e

rebolo, a profundidade de corte, a refrigeração do sistema, o material da peça e, principalmente, a dressagem do rebolo são fundamentais para produzir a textura que vai ser avaliada através da medição da rugosidade.

A norma NBR 6405/1988 estabelece que a textura superficial seja o conjunto de desvios repetitivos ou aleatórios com relação a uma superfície nominal, geométrica ou teórica, através da qual estabelece critérios apropriados para especificações e definições. A superfície geométrica é aquela superfície ideal prescrita pelo projeto, na qual não existem erros de forma de acabamento, que envolve uma superfície na qual a micro rugosidade pode ser comensurada como o diâmetro das moléculas superficiais, e o conceito idealístico da superfície de um líquido em repouso absoluto.

A superfície, real consiste na delimitação que separa um objeto do espaço que o envolve, ou, em outras palavras, na superfície resultante da fabricação, ou seja, com todos os desvios gerados pelo processo. A superfície efetiva ou medida é a representação da superfície real determinada por instrumentos de medição e outros meios. Esta grande aproximação entre ambas depende quase que exclusivamente, da precisão do instrumento ou do meio empregado (sensibilidade, fidelidade, precisão), das técnicas de medição aplicada, bem como da própria natureza da superfície real Figura 6 (SOUZA, 1980).

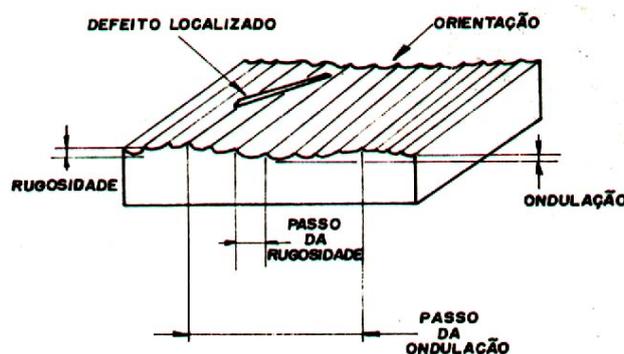


FIGURA 6 – SUPERFÍCIE REAL IDENTIFICANDO DEFEITOS E
ONDULAÇÕES

FONTE (SOUZA, 1980)

Em operações de engenharia, os perfis de rugosidade analisados são efetuados através do contato direto, ou seja, através do apalpador de um perfilômetro ou de um rugosímetro.

Contudo dois efeitos são modificadores do perfil analisado e podem fornecer através destes aparelhos perfis de superfícies que não retratem a realidade, tendo como dependência a carga aplicada no apalpador de leitura, e o raio da ponta do próprio apalpador (GARCIA *et al*, 2000).

Os perfis de rugosidade podem ser obtidos sem o contato físico, através de sistema ótico. Na microscopia eletrônica de varredura, e no caso a interferometria ótica, onde perfil da superfície é captado por meio de varredura de ondas eletromagnéticas. Desta forma surgem os perfis para serem analisados e que são classificados quanto a sua formação (SOUZA, 1980).

O perfil especificado da mesma forma consiste na intersecção da superfície especificada com plano perpendicular ou inclinado a um determinado ângulo em relação à superfície geométrica. Trata-se, portanto do perfil geométrico mais todas as adições das tolerâncias dimensionais e de acabamento (SOUZA, 1980).

O perfil real por sua vez é dado pela intersecção da superfície real com um plano perpendicular ou inclinado a um ângulo determinado com relação à superfície geométrica ou nominal, que resultou do método empregado para a fabricação, conforme apresenta a Figura 7.

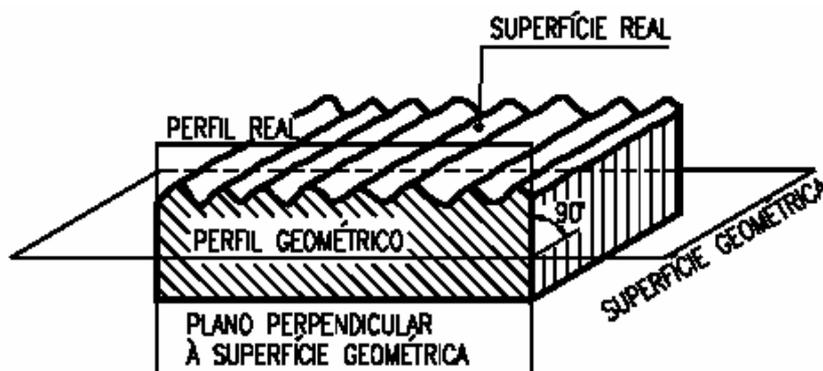


FIGURA 7 – PERFIL REAL CORTADO NO PLANO PERPENDICULAR

FONTE: (ABNT-NBR 6405/1988).

Para que se possa avaliar a rugosidade deve-se antes conhecer o comprimento da amostragem que também é chamado de *cut off*. De acordo com a norma NBR 6405/1988, o comprimento da amostragem é dado por (l_e) enquanto que o comprimento efetivo de uma superfície é dado por (l_m), é recomendação da norma ISO, que os rugosímetros devam medir cinco (5) comprimentos de amostragem e só depois indicar o valor médio de medição.

Assim a distância percorrida pelo apalpador deve ser igual a $5l_e$ mais a distância para se atingir a velocidade de medição (l_v) e para a parada do apalpador (l_n). Como o perfil apresenta a rugosidade e a ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação. A Figura 8 apresenta o perfil da rugosidade obtido a partir do perfil efetivo, apresentado depois de uma filtragem para eliminar ondulações, (ABNT. NBR 6405/1988).

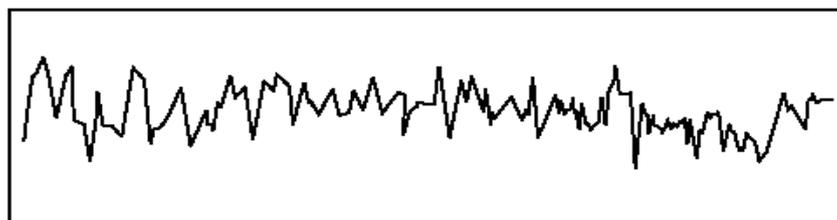


FIGURA 8 – PERFIL DA RUGOSIDADE APÓS FILTRAGEM DE ONDULAÇÃO

FONTE. (ABNT-NBR 6405/1988)

3.2.1. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

São vários os parâmetros que podem ser utilizados para a medição da rugosidade de uma dada superfície. Um dos parâmetros é o R_a definido como sendo o desvio médio de um perfil de sua linha média, ou seja, a distância média de um perfil desde a sua linha média, sobre um comprimento medido.

Assim a rugosidade R_a , (*roughness average*), pode ser definida como sendo a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (Y_i), dos pontos do perfil de rugosidade com relação à linha média, dentro do percurso de medição, conforme ilustrado na Figura 9.

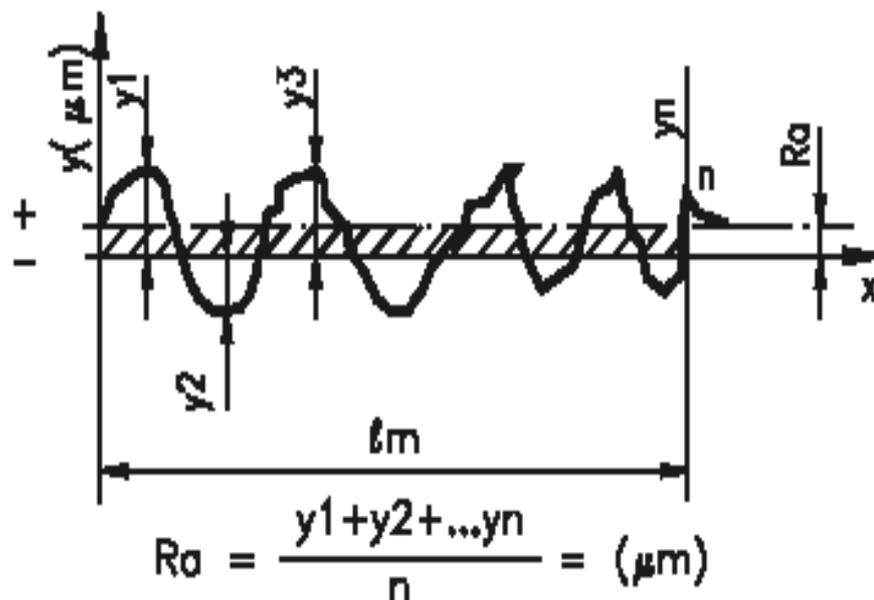


FIGURA 9 – RUGOSIDADE MÉDIA R_a

FONTE: (ABNT-NBR 6405/1988)

As vantagens de medição pelo parâmetro R_a é a sua utilização mundial, e o mesmo é aplicado na maioria dos processos de fabricação, sendo que valor desta rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude. Da mesma forma, ocorrem

desvantagens na aplicação deste método, principalmente quando um pico ou vale aparece na superfície, o valor da média não sofre alterações, ocultando o defeito. O valor de R_a não tem uma definição quanto à forma das irregularidades do perfil, podendo ser dado um mesmo valor de R_a , para superfícies originadas por diferentes processos (ABNT-NBR 6405/1988).

De acordo com a norma NBR 8404/1984 de indicação do estado de superfícies em projetos e desenhos técnicos, o valor da rugosidade R_a poder ser indicado pelos números da classe de rugosidade correspondente, conforme Tabela 1.

TABELA 1 – NÚMERO DE CLASSE DE RUGOSIDADE R_a PARA SUPERFÍCIES.

FONTE: ABNT-NBR 8404/1984

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE R_a valor em μm
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

A identificação da rugosidade pode ser realizada através de vários parâmetros que estão relacionados para as mais diversas aplicações, onde a norma ISO 2632 estabelece estes procedimentos para ajustes de vedação, interferência e dinâmica dos elementos de um conjunto. A norma DIN 4766 também estabelece valores para a rugosidade média nas operações de usinagem.

A Tabela 2 classifica acabamentos superficiais geralmente encontrados na indústria mecânica, classificados em 12 grupos organizados de acordo com o grau de rugosidade, e o processo de usinagem que pode ser utilizado para a sua obtenção (ABNT-NBR 6405/1988).

TABELA 2 – CLASSIFICAÇÃO DE R_a (μm) SEGUNDO O PROCESSO DE FABRICAÇÃO.

FONTE: (ABNT-NBR 6405/1988).

Grupos de rugosidades	▽			▽▽			▽▽▽			▽▽▽▽		
Rugosidade máxima valores em R_a (μm)	50			6,3			0,8			0,1		
Classes de rugosidade (GRADE)	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Rugosidade máxima valores em R_a (μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
Informações sobre os resultados de usinagem												
Serrar	[Barra hachurada]											
Limar	[Barra hachurada]											
Plainar	[Barra hachurada]											
Tornear	[Barra hachurada]											
Furar	[Barra hachurada]											
Rebaixar	[Barra hachurada]											
Alargar	[Barra hachurada]											
Fresar	[Barra hachurada]											
Brochar	[Barra hachurada]											
Raspar	[Barra hachurada]											
Retificar (frontal)	[Barra hachurada]											
Retificar (lateral)	[Barra hachurada]											
Alisar	[Barra hachurada]											
Superfinish	[Barra hachurada]											
Lapidar	[Barra hachurada]											
Polir	[Barra hachurada]											

O parâmetro R_y é também muito empregado e tem as suas vantagens e desvantagens. Este parâmetro tem a vantagem de ser um indicador da distância máxima dos limites de picos e vales do comprimento de medição.

Por outro lado o processo pode avaliar uma superfície com erros que em muitas das vezes não representam a superfície como um todo, principalmente se o pico mais alto estiver no começo da superfície analisada e o vale mais profundo no final desta (SOUZA, 1982).

Outro parâmetro que pode ser empregado é o R_z , que ao contrario do R_y , avalia a distância média entre os 5 picos mais altos e os 5 vales mais profundos, dentro de um comprimento de medição estabelecido pela ISO 4287. As igualdades dos valores de R_y e R_z fornecem dados mais objetivos da superfície analisada, enquanto que as diferenças entre os mesmos são indícios de defeitos mais significativos, principalmente quando se espera uma superfície com maior qualidade (SOUZA, 1982).

Para o processamento de uma peça deve ser estabelecido também o meio pelo qual esta superfície poderá ser produzida e também a direção das estrias, marcas das ferramentas de usinagem. As marcas de ferramentas influem na resistência de certos componentes, pois agem como concentradoras de tensão, levando a diminuição do limite da resistência à fadiga (SOUZA, 1982).

3.3. ENSAIO DE MICRO DUREZA E DUREZA

A propriedade mecânica que se refere à resistência de um corpo não ser penetrado ou ser riscado por outro denomina-se dureza. Esta propriedade é empregada para a especificação de materiais, principalmente nas áreas de projetos de engenharia, bem como metalurgia. Desta forma, cada área integrante desta composição trata a dureza de forma diferenciada esta propriedade (GARCIA *at al*, 1999).

Quando em metalurgia a dureza tem significado quanto à resistência a deformação plástica permanente, e quando parte integrante de um projeto sua significância é considerada uma medida para conhecimento da resistência e

dos tratamentos térmicos ou mecânicos, e principalmente de sua resistência ao desgaste (SOUZA, 1982).

Em ciências dos materiais o termo dureza depende das forças de ligação entre os átomos íons ou moléculas, assim como da resistência mecânica. Em sólidos metálicos e iônicos as forças de ligação são mais intensas, portanto estes são mais duros (CALLISTER, 2002).

Em materiais metálicos, a medição da dureza consiste na impressão de uma pequena marca na superfície da peça com a aplicação de uma força de compressão sobre uma ponta de penetração. A medida da dureza da superfície depende das características da marca da impressão e da carga aplicada no penetrador (ASKELAND, 1996).

Os ensaios de dureza mais utilizados são: Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop e Meyer e a dureza por choque Shore. Neste trabalho será dada ênfase à dureza Rockwell (*HRC*) e Micro Dureza Vickers. O ensaio de dureza Vickers foi introduzido em 1925 por Smith e Sandland. Neste tipo de ensaio o penetrador tem uma ponta de diamante padronizada de base quadrada e com um ângulo de 136° entre as faces opostas. Pela forma do penetrador, este ensaio é também conhecido como teste de dureza da pirâmide de diamante (SOUZA, 1982).

Como o penetrador é indeformável, todas as impressões colhidas do ensaio são semelhante independente da carga aplicada, isto é, o número de dureza que se obtém é sempre igual, mesmo que ocorra a variação da carga aplicada, principalmente quando aplicada em materiais homogêneos. Também se emprega este tipo de ensaio para materiais de alta dureza, materiais em forma de lâminas, pequenas e irregulares (GARCIA *et al*, 1999).

A carga é determinada de forma a permitir boa leitura das diagonais da impressão, através do microscópio acoplado a máquina de ensaio. A carga

aplicada pode variar de 5,0 a 100 Kgf ou também de 49 N a 980 N, sendo que esta mudança de carga é fundamental para se obter impressão de forma regular, sem deformação e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões no microscópio da máquina.

A impressão deixada na peça tem o formato de um losango regular, e pela média da medida (L) de suas diagonais. Quando o ensaio for realizado com carga pequena as mesmas podem variar de 1,96 N a 49 N, e quando com micro carga de 1,96 N a 0,0098 N. Como relatado anteriormente a carga está relacionada com a facilidade da leitura das diagonais. (GARCIA *et al*, 1999).

Para a realização deste ensaio utiliza-se da norma brasileira NBR-6672, que tem vantagens quanto a outros métodos de medição de dureza e por:

- > Escala de aplicação de carga contínua que facilita a utilização;
- > Impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça após o ensaio;
- > Deformação do penetrador devido à dureza e forma é nula;
- > Utilização de escala única de leitura que facilita a interpretação;
- > Vasto campo de aplicação, praticamente a todos os materiais;
- > Pode ser aplicado a materiais de qualquer espessura desde que mantida a observação da não ocorrência de deformação do lado oposto da superfície ensaiada;
- > Indicado para levantamento de curvas de profundidade de têmpera e cementação;
- > Tem grande aplicação em linhas de pesquisas.

A Figura 10 mostra a forma do penetrador que é uma pirâmide de base quadrada com ângulo de 136° entre faces opostas.

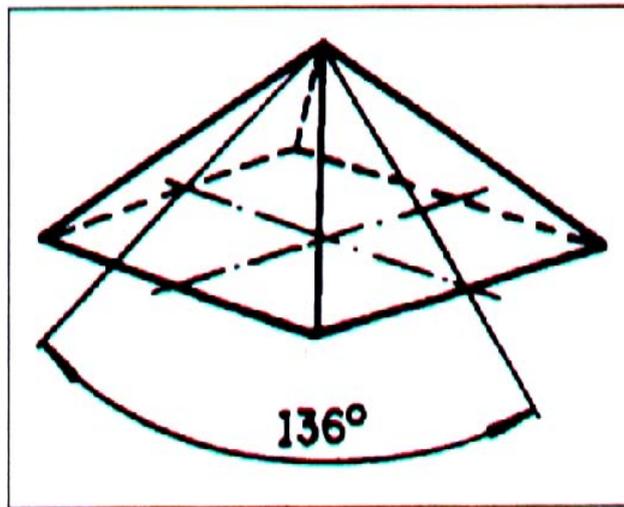


FIGURA 10 – ÂNGULO DA PONTA DO PENETRADOR

FONTE: (GARCIA *et al*, 1999).

Porém o ensaio de dureza Vickers necessita de alguns cuidados quanto à preparação da superfície de ensaio. A peça a ser ensaiada deve apresentar uma superfície polida, plana, e perpendicular ao eixo de simetria do penetrador.

A carga deve ser aplicada de forma lenta e gradual até a carga total por um tempo médio de 20 segundos, evitando assim os efeitos da inércia e descarga brusca da carga aplicada (SOUZA, 1982).

A impressão deve ser realizada na superfície plana da peça que por sua vez deve ter uma espessura mínima de 1,5 do tamanho da diagonal da impressão, evitando assim deformações na face oposta ao ensaio.

A Figura 11 define as espessuras mínimas da peça com relação à carga aplicada e à dureza do material ensaiado (GARCIA *et al*, 1999).

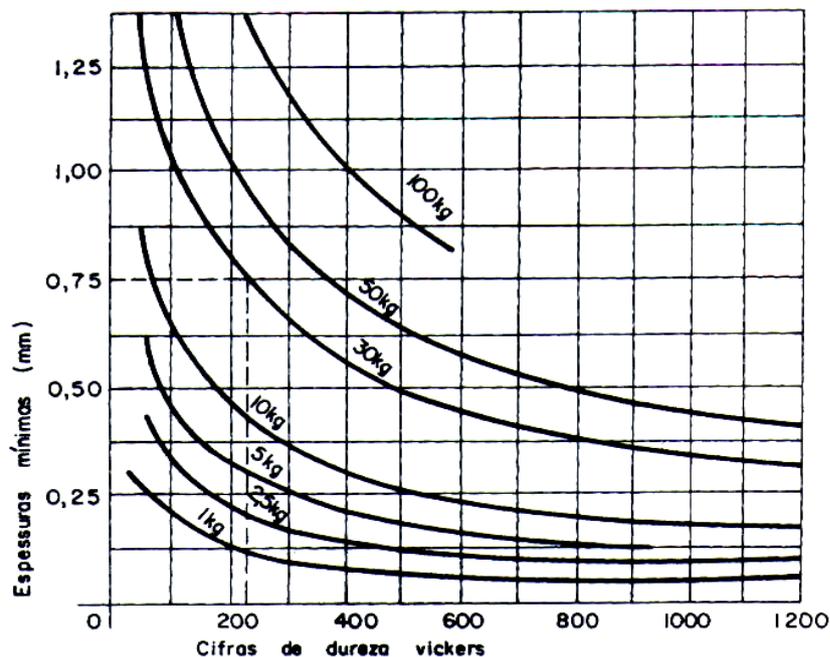


FIGURA 11 – RELAÇÃO CARGA X DUREZA X ESPESSURA DO MATERIAL

FONTE: (GARCIA *et al*, 1999)

Quanto à preparação da superfície de ensaio, devem ser seguidos os mesmos procedimentos da preparação de ensaios metalográficos. No ensaio pode ocorrer o encruamento do metal na superfície o que afetara o resultado, portanto o polimento eletrolítico é recomendado, pois torna mais nítida a impressão para a tomada da medida das diagonais, diminuindo também a ocorrência de erros na impressão. Caso seja necessário é importante antes ao polimento eletrolítico, a remoção de alguns microns da camada superficial através de polimento mecânico (SOUZA, 1982).

3.3.1. MICRO DUREZA VICKERS

Segundo Garcia *et al*, (1999), em algumas situações práticas, ocorre à necessidade de determinação da dureza de pequenas áreas de uma peça ou corpo de prova. A medida do gradiente de dureza que se verifica em

superfícies cementadas e a determinação da dureza individual de microconstituintes de uma estrutura metalografica são alguns exemplos destas situações.

Souza (1982) descreve que além da determinação das profundidades de superfícies carbonetadas, de têmpera, cementação, a dureza Vickers é muito utilizada para pesquisas estudos etc., além da determinação de dureza dos constituintes individuais de uma microestrutura de materiais frágeis de peças pequeníssimas ou extremamente finas, é geralmente solucionado com aplicação de micro dureza.

O ensaio de micro dureza estampa no material uma impressão microscópica empregando carga inferior a 1,0 Kgf. A carga aplicada pode ainda chegar ao mínimo de 10,0 gf, desde que a superfície de ensaio seja preparada com todos os procedimentos idênticos a preparação da dureza Vickers conforme a Figura 12.

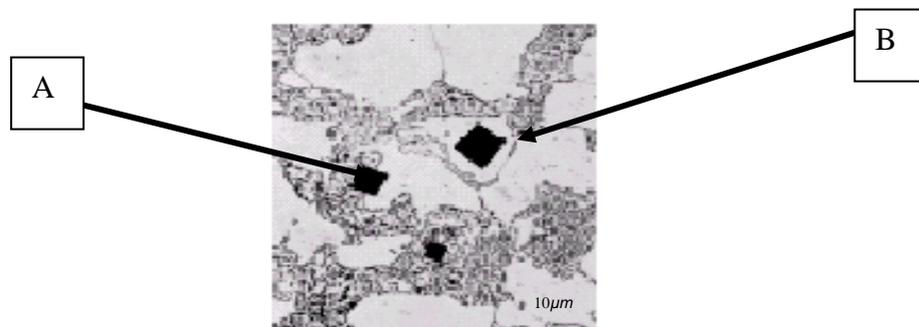


FIGURA 12 - IMPRESSÃO (A) e (B) DA MICRODUREZA VICKERS

FONTE: (GARCIA *et al*, 2004)

Dependendo da forma do penetrador, existem dois tipos de micro dureza: Vickers e Knoop. A micro dureza Vickers (HV), utiliza a ponta de diamante, enquanto que a dureza Knoop (HK), faz uso do penetrador de diamante cuja forma é de uma pirâmide alongada, que produz uma impressão de diagonal maior e outra de diagonal menor, em uma proporção de 7:1. A profundidade da impressão pode alcançar 1/30 da diagonal menor (SOUZA, 1982).

A dureza Knoop apresenta ainda alguma diferença com relação à dureza Vickers. Ocorre que a dureza Knoop aumenta na medida em que a carga diminui abaixo de 200 gf até 20 gf, enquanto que na dureza Vickers a dureza diminui com a aplicação de cargas extremamente baixas como apresenta a figura 13.

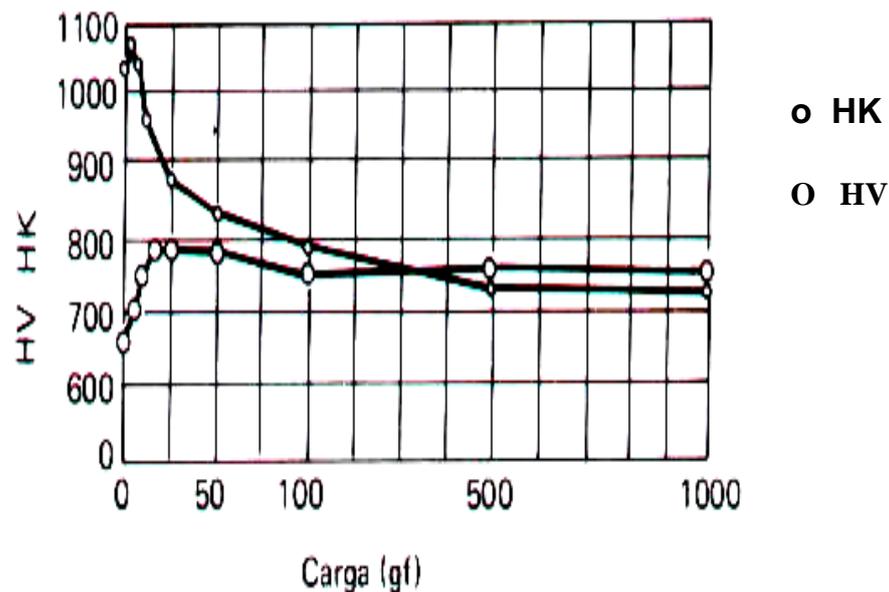


FIGURA 13 - VARIAÇÃO HK E HV COM CARGA DE ENSAIO DE MICRODUREZA

FONTE: (SOUZA, 1982)

A diferença entre estes ensaios, é o penetrador de ponta de diamante que deve sempre terminar com uma ponta admitindo para a o penetrador Vickers um bisel de comprimento 0,5 *microns*, e para o penetrador Knoop de apenas 1 *micron* (SOUZA, 1982).

A dureza Knoop apresenta ainda uma grande sensibilidade quanto à orientação da superfície ensaiada que é a anisotropia, principalmente quando o objetivo é a medição de dureza de um grão cristalino, por ter uma impressão de diagonal maior e mais alongada que a dureza Vickers.

3.3.2. DUREZA ROCKWELL

Os ensaios Rockwell constituem o método mais comumente utilizado para medir a dureza, pois eles são muito simples de executar, não exigem qualquer habilidade especial. Diversas escalas diferentes podem ser utilizadas a partir de combinações possíveis de vários penetradores e diferentes cargas, as quais permitem ensaios de todos os metais e suas ligas, desde os mais duros até os mais macios (CALLISTER, 2002).

As condições para ensaio de dureza superficial são as seguintes:

- Inicialmente, deve-se observar que, nas mudanças de cargas no durômetro, a primeira leitura do ensaio não é válida, devido a possíveis acomodações.
- A posição do penetrador deve ser perpendicular à peça, que não deve se movimentar durante o ensaio.
- A superfície da peça deve ser plana, lisa e isenta de partículas duras que podem prejudicar o resultado do ensaio.
- O penetrador deve ser colocado em contato com a peça e é aplicada uma carga de 10 Kgf.
- Em seguida, zera-se a escala do relógio para o zero escala coincidir com o ponteiro.
- Aplica-se a carga de ensaio, ou seja, uma carga total de 150 Kgf.
- A carga é mantida por um tempo até o ponteiro do relógio parar.
- Retira-se a carga mantendo-se a pré-carga. O ponteiro move-se para a esquerda, devido à recuperação elástica do material.
- Efetua-se leitura da dureza diretamente na escala do relógio do instrumento.

Pode ser realizada comparação entre os vários métodos de medição de dureza Tabela 3.

TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE DUREZA

(ADAPTADO DE ASKELAND, 1996)

Método de ensaio de dureza	Tipo da ponta de impressão	Carga	Aplicação
Brinell (HB)	Esfera de aço de 10, 5, e 1 mm	Depende da razão P/D^2	Componentes fundidos, forjados e laminados ferrosos e não ferrosos esfera de aço para durezas na ordem de 450 HB e esfera de carboneto de tungstênio para durezas da ordem de 650 HB.
	Esfera de carboneto de tungstênio	Acima de 3000Kgf para o aço	
Vickers (HV)	Pirâmide de diamante base quadrada e 136°	1 a 120 Kgf	Todos os aços e ligas não ferrosas. Materiais de alta dureza, incluindo carboneto de tungstênio e cerâmicos.
Rockwell HRB, HRC	Cone de diamante 120° ou esfera de aço "d" ($1/16" \leq d \leq 1/2"$)	Maior que 60 a 150 Kgf e menor que 10 Kgf	Ferrosos e não ferrosos, forjados e fundidos.
Microdureza	Pirâmide de diamante base quadrada e 136°	1 a 1000gf	Camadas superficiais, folhas finas, arames, fases microscópicas, zona termicamente afetadas (ZTA) em soldas.
Knoop	Pirâmide de diamante, base rômica, (razão 7:1)		

3.4. TÊMPERA POR RETIFICAÇÃO

A tempera por retificação é um processo novo que possibilita o endurecimento da superfície dos componentes dos aços. Na tempera por retificação, utiliza-se o calor gerado na superfície de retificação do contato peça e rebolo para endurecimento da camada superficial do material.

Por outro lado, o endurecimento desta camada superficial revela fatores importantes que depende das propriedades do material e também do rebolo de retificação, desde que todos os parâmetros de entrada do processo sejam controlados (BRINKSMEIER *et al*, 2003).

As avaliações das propriedades estruturais da superfície podem ser avaliadas pela medição da dureza, pela análise das tensões residuais, pelos testes de fadiga que pela medição da rugosidade, que comprovam a estabilidade do processo de tempera por retificação segundo (BRINSMEIER *et al*, 2003).

Na tempera por retificação (*grind-hardening*), o fluxo de calor gerado pela retificação pode ser empregado para induzir a transformação de fase nas camadas superficiais do aço, criando uma superfície endurecida onde são geradas tensões residuais dominantes de compressão. O endurecimento por retificação não deve ser confundido com a queima da superfície também conhecida como (*burn*), de coloração branca onde as tensões residuais induzidas são elásticas (HEISEL, 1998).

Na tempera por retificação com refrigeração a máxima camada de penetração da dureza obtida em ensaios para superfície plana foi de 2,0 mm, e para superfície cilíndrica 1,6 mm, quando analisadas superfícies de peças ensaiadas de um aço 42 CrMo4 (BRINKSMEIR, 2003).

Ainda Brinksmeier (2003), descreve que neste tratamento térmico, as propriedades importantes do rebolo são:

- Ótima condução térmica do abrasivo;
- Grãos com alta resistência de liga;
- Baixa tendência de retenção do material da peça entre os grãos;
- Pouca porosidade e estrutura bem fechada entre os grãos.

O melhor rebolo para desempenhar este tipo de retificação é o rebolo de Al_2O_3 , resinoide. Melhores resultados poderiam ser obtidos com rebolos CBN, mas por motivos econômicos este rebolo não é favorável para este tipo de ensaio, segundo (BRINSMEIER, 2003).

Segundo Heizel (1998), o processo de tempera por retificação para transformação martensítica, deve ser aplicado em ambientes com máquinas e ferramentas capazes de retificar e resfriar.

Segundo Brinksmeier, (2003) a têmpera por retificação é um processo de têmpera superficial obtido por retificação. O processo de formação de cavaco e de fricção na área de trabalho, entre peça e rebolo, levam a uma transformação da estrutura superficial do material, no processo de têmpera por retificação. Este processo de endurecimento superficial, pode ser comparado com a têmpera a *laser* que produz uma espessura de camada endurecida de 1,0 mm de acordo com testes preliminares em uma série de corpos de prova.

Enquanto o primeiro passo serve para a produção de uma quantidade de calor definida para transformação da camada superficial, os outros passos permitem atingir a forma desejada e precisão dimensional da peça Figura 14.

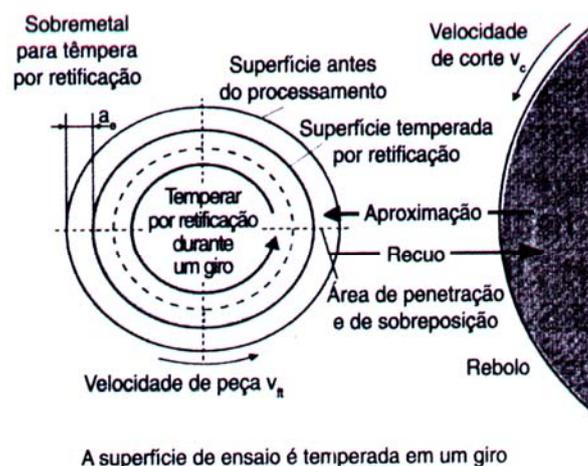


FIGURA 14 – TÊMPELA POR RETIFICAÇÃO

FONTE. (BRINKSMEIER, 2003)

O tempo de contato entre a peça e o rebolo é uma medida característica para duração da influência térmica em pequeno espaço de tempo. No ciclo de

usinagem a seco, a camada superficial da peça e rebolo, estão submetidas à esforços elevados de força e temperatura (BRINKSMEIER *et al*, 2003).

A Figura 15 reproduz o ensaio sendo executado por Brinksmeier *et al*, (2003).

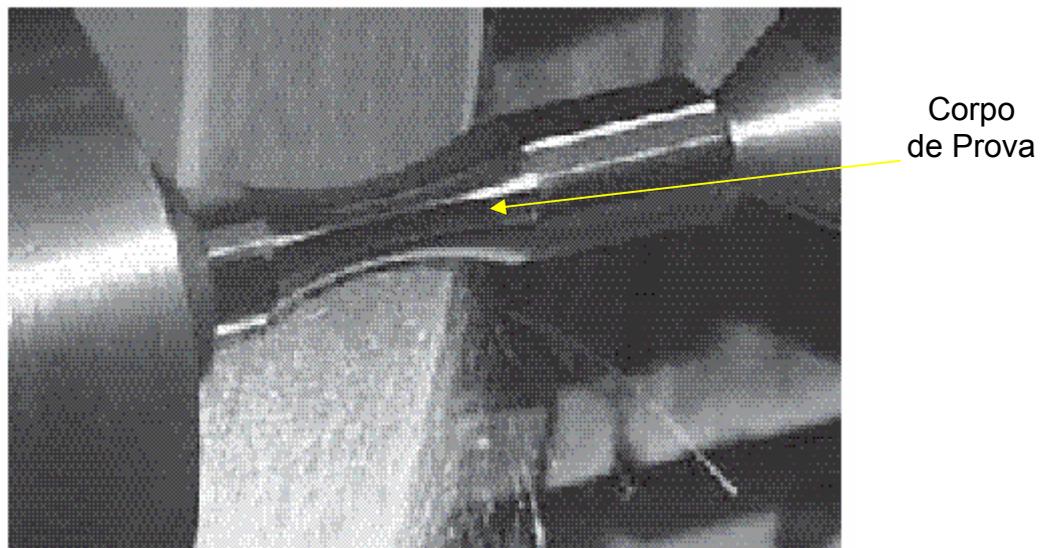


FIGURA 15 – ENSAIO DE RETIFICAÇÃO

FONTE. (BRINKSMEIER *et al*, 2003)

O material empregado por Brinksmeier *et al*, 2003 foi o aço 42CrMo4V, previamente usinado no comprimento 62 mm, tendo o seu menor diâmetro d_w 7,2mm. A largura de ataque (a_p) que é a superfície de contato do rebolo determinada foi de 18,8mm.

Foram realizadas, uma série de ensaios de têmpera em 30 corpos de prova, dos quais foram obtidas médias de dureza de 700 HV 0,5. Observou-se durante as medições de dureza que as mesmas mantiveram-se estáveis até a profundidade de 0,35mm, diminuindo a medida que se aproxima da zona de transição entre as camadas.

3.4.1. TRATAMENTO TÉRMICO

A modificação das propriedades físicas e mecânicas de um determinado aço pode ser feita através de ciclos de aquecimento e resfriamento. Dependendo da aplicação, determina-se o tipo de tratamento térmico a ser realizado, que leva em conta fatores modificadores, tais como o tempo, temperatura e velocidade de resfriamento.

Para alguns tipos de tratamento térmico, a atmosfera de tratamento tem influência direta nas propriedades (CALLISTER, 2002)

As modificações destas propriedades podem ser de caráter parcial, ou total, dependendo da função desempenhada pelo produto final. Para modificações de caráter parcial, são empregados tratamentos termoquímicos que são realizados com combinação da atmosfera controlada, e que, através dos ciclos de aquecimento e resfriamento permitem executar estas modificações. Nestas condições a composição química superficial do aço é alterada (CALLISTER, 2002)

Em outros casos, quando há a necessidade de modificações totais outros ciclos de tratamento térmico são aplicados, contudo sem alterar as propriedades químicas do material, sendo estas alterações de caráter apenas superficial.

O processo de têmpera também é caracterizado por ciclos de aquecimento e resfriamento do aço que por sua vez altera a estrutura e a estrutura altera as propriedades do aço. Para que tal tratamento seja realizado é necessário o controle do tempo e temperatura que dá origem à transformação (CALLISTER, 2002).

3.4.2. FORMAÇÃO DA MARTENSITA

Segundo Callister (2000), um outro constituinte, ou fase, conhecido por martensita, é formada quando ligas de ferro e carbono são austenitizadas e resfriadas rapidamente à uma temperatura relativamente baixa, próxima à temperatura ambiente. A martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio resultante da transformação sem difusão da austenita.

A martensita pode ser considerada como sendo um produto da transformação que compete à perlita e à bainita. A transformação martensítica ocorre quando a taxa de têmpera é rápida o suficiente para prevenir a difusão do carbono. Qualquer difusão que porventura venha a ocorrer resultará na formação das fases ferrita e cementita (CALLISTER, 2000).

O diagrama de equilíbrio TTT considera o fator tempo e temperatura. Este diagrama é composto por duas linhas onde a primeira representa o início da transformação e a segunda o fim da transformação. Estas linhas identificam que a velocidade de transformação é variável, sendo mais baixa para aços eutetoides, e aumentam para temperaturas intermediárias e voltam a diminuir para temperaturas mais baixas (CALLISTER, 2002).

A influência da composição da liga sobre a habilidade de uma liga de aço se transformar em martensita para um tratamento de têmpera específico está relacionada a um parâmetro que é conhecido por temperabilidade. Para cada liga de aço diferente existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e taxa de resfriamento (CALLISTER, 2002).

Endurecibilidade é um termo usado para descrever a habilidade de uma liga de ser endurecida pela formação de martensita como resultado de um dado tratamento térmico. Uma liga de aço que possui uma endurecibilidade elevada, é uma liga que endurece, ou forma martensita, não apenas na sua superfície, mas em elevado grau também ao longo de todo o seu interior. (CALLISTER, 2002).

Para temperaturas próximas de 500°C a austenita se transforma em perlita. Quando se aproxima de 200°C aparece um novo constituinte originando a martensita. A formação da estrutura martensítica não depende do tempo de resfriamento, sendo a temperatura responsável pela sua transformação.

Os elementos de liga deslocam a curva de início e fim da transformação para a direita, que significa que o processo é mais demorado. Estas diferenças podem ser verificadas no diagrama TTT do aço AISI 4340 que é objeto de estudo neste trabalho e Figura 16.

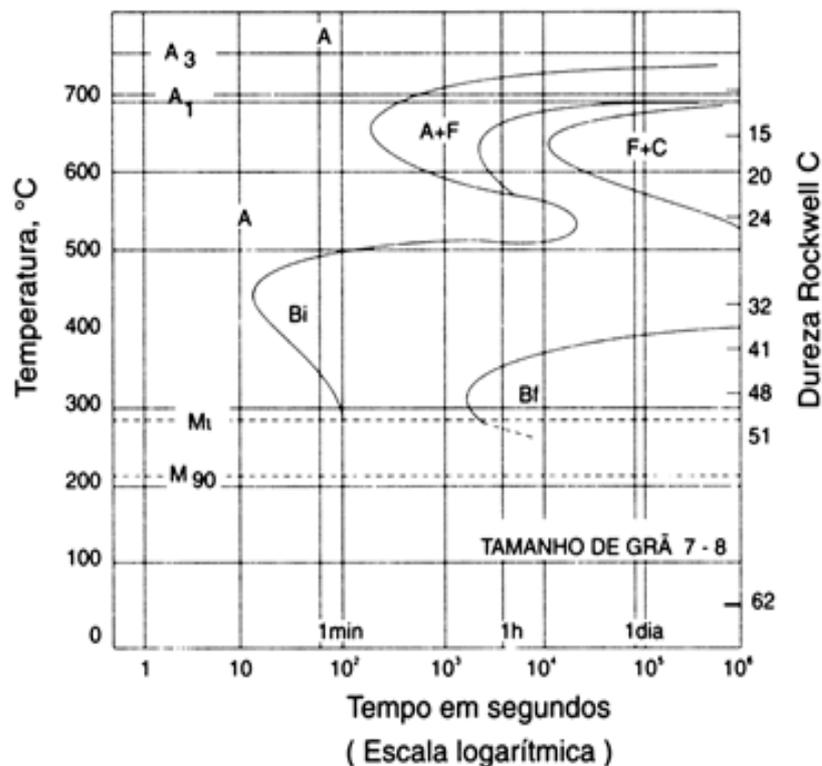


FIGURA 16 – CURVA TTT AÇO AISI 4340

FONTE. (BRASIMET, 2003)

4. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO EXPERIMENTAL

No processo convencional, têmpera e retificação são realizadas em máquinas diferentes e locais diferentes, conforme a Figura 17 (VIEIRA, 1992). Este processo demanda tempo, causa inflexibilidade produtiva, aumenta os tempos de produção, e aumenta os custos do produto, sem falar em outros custos da improdutividade de transporte e logística do sistema.

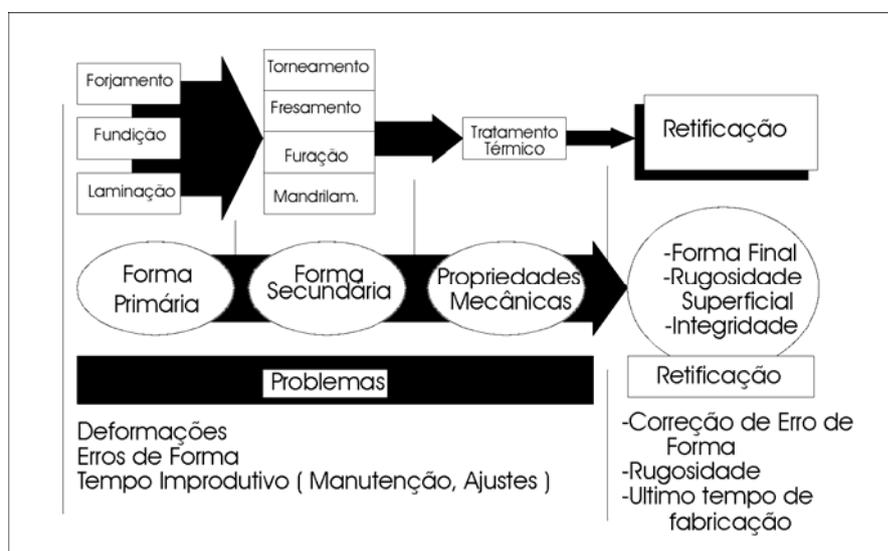


FIGURA 17 – IDENTIFICAÇÃO DA RETIFICAÇÃO DENTRO DA SEQUÊNCIA DE FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA

FONTE: (VIEIRA, 1992).

A fim de obter a têmpera de peça durante o processo de retificação, para otimizar um ciclo de fabricação, faz-se necessário obedecer ao procedimento metodológico descrito a seguir, destacando-se que se trata de um trabalho experimental baseado em pesquisa bibliográfica.

Inicialmente, deve-se definir os aspectos referentes ao corpo de prova a ser utilizado. Numa operação de retificação de mergulho, como a que será realizada, é recomendável que o corpo de prova tenha dois ou mais colos para

serem retificados. Além disso, o material do corpo de prova deve ser escolhido por meio de critérios condizentes com o objetivo do trabalho (têmpera da peça), e com uso do meio industrial.

Na seqüência, deve-se definir os parâmetros operacionais que serão utilizados: condições de dressagem (U_d), a velocidade de corte (V_s), a velocidade da peça (V_w) e o avanço de mergulho (f), pois essa combinação é que determinará a parcela de energia mecânica envolvida no processo que se transformará em energia térmica, provocando o aquecimento da peça e a mudança de fase. Segundo König *apud* Vieira (1992), a fenomenologia de corte do processo abrasivo é explicada conforme mostra a Figura 18, na qual observam-se três fases distintas durante a remoção de cavaco:

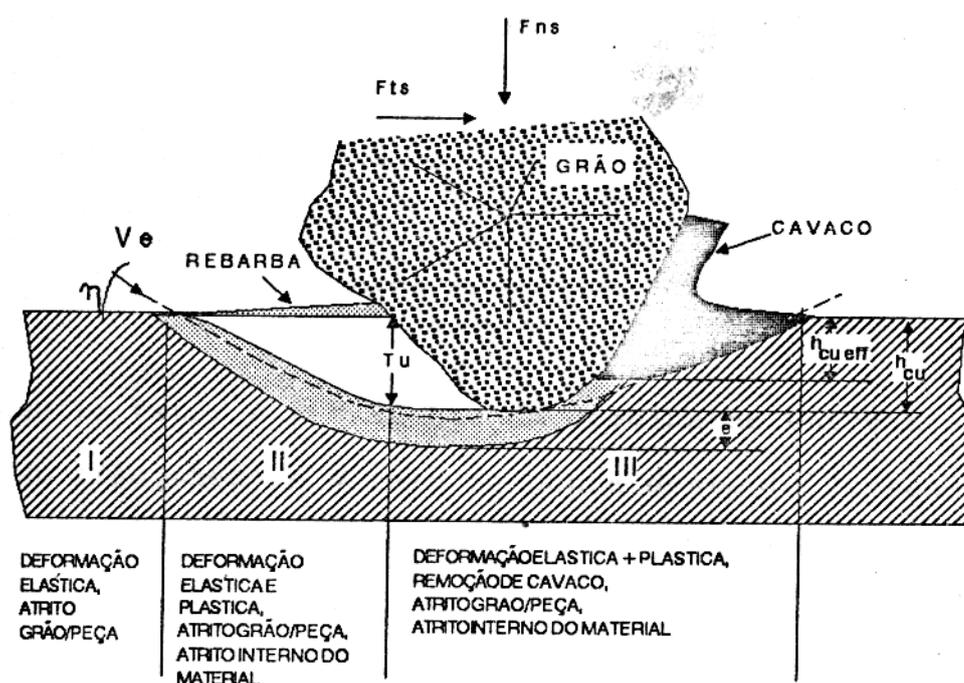


FIGURA 18 - FASES DA REMOÇÃO DE CAVACO NA RETIFICAÇÃO

FONTE: (VIEIRA, 1992)

- Numa primeira fase, ocorre apenas o atrito entre o grão abrasivo e peça, provocando a deformação elástica desta e gerando calor para o processo;
- Numa segunda fase, começam a aparecer deformações plásticas no material e ainda o atrito interno do material devido ao escoamento, somados ao que ocorre na fase I;
- Na terceira fase é que começa a ocorrer o acúmulo de material em frente ao grão abrasivo, ou seja, a separação da peça com a conseqüente formação de cavaco;

A existência dessas três fases, em especial da terceira fase, faz com que a energia mecânica seja transformada em energia térmica devido ao atrito e às deformações, e promova o aquecimento da região de contato entre o rebolo e a peça. No entanto, a duração de cada uma dessas fases depende, como já foi dito anteriormente, dos parâmetros operacionais utilizados:

- A dressagem (U_d), restaura a capacidade de corte do rebolo. Quanto menor for (U_d), mais agressiva fica a superfície do rebolo, e menores são as forças de corte e maior será a rugosidade na peça. Para este trabalho U_d na operação de têmpera será de 1,0 e para a operação de acabamento 5,0;
- A velocidade de corte do rebolo (V_s) tem influência sobre o ângulo de ataque η do grão abrasivo sobre a peça. Quanto maior for essa velocidade, menor será o ângulo η . Nos ensaios deste trabalho, V_s será mantida em 35 m/s, tendo em vista que é a velocidade que mais se aplica na produção industrial. Esta velocidade será mantida constante, tanto na operação de têmpera quanto na operação de acabamento final;

- Para a velocidade da peça (V_w), o usual em retificação é adotar valores equivalentes à até $V_s/60$, o que resulta em $V_{wmáx} = 0,58$ m/s (ou 35 m/min). No presente trabalho, serão empregadas duas velocidades distintas: uma para o acabamento, com valor na faixa usual, e outra para a têmpera, com valores significativamente menores;
- Assim, para o ciclo de têmpera, será adotada a rotação da peça em torno de 7 rpm, com o objetivo da manutenção do tempo de contato para elevação da temperatura necessária para a ocorrência da transformação da estrutura do material; e no ciclo de acabamento, esta rotação será aumentada para 50 rpm, que é compatível com a velocidade indicada para o ciclo de acabamento final, que gera menor rugosidade superficial;
- O avanço de mergulho (f) determinará a porção de material que será removida a cada rotação da peça, e tem influência sobre a espessura de corte do grão abrasivo no contato com a peça (h_{cu} e h_{cueff}): quanto maior for a profundidade de avanço adotada, maior será o valor de h_{cu} e de h_{cueff} ;
- Assim, no presente trabalho deverão ser adotados valores elevados para f . Em operações usuais, os valores utilizados são da ordem de micron por rotação; no caso do ciclo de têmpera, deverão ser adotados valores da ordem de centésimos de milímetro por rotação, e no ciclo de acabamento, os valores adotados deverão ser os usuais;
- O tempo de contato entre o rebolo e a peça é uma medida característica para a duração da influência térmica. O pequeno espaço de tempo de duração do ciclo de têmpera, que fica à disposição para a temperatura de transformação da estrutura exige elevadas velocidades de aquecimento do material. Isso induz a determinar que a profundidade de corte estabelecida deve possibilitar que o ciclo de têmpera seja viável.

- Operações usuais de retificação têm profundidades de corte pequenas, com remoção de camadas de ordem milesimal ou, no máximo, centesimal. A fim de provocar maior interação entre rebolo e peça, no processo de aquecimento deverão ser adotados valores de profundidade compatíveis com operações de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, ou seja, na ordem de até um milímetro.

4.1 DEFINIÇÃO DO CICLO DE OTIMIZAÇÃO

O ciclo de otimização do processo da têmpera por retificação é composto basicamente das seguintes etapas: a têmpera por retificação e a retificação de acabamento. O primeiro passo serve para a produção de uma quantidade de calor suficiente para a transformação da camada superficial, e o passo seguinte permite atingir a forma desejada e precisão dimensional da peça.

A usinagem começa com a peça em movimento e a penetração do rebolo até chegar à medida do diâmetro da peça, com acréscimo de sobre-metal necessário para o acabamento. Ao ser alcançada a profundidade de penetração, e após um giro da peça nessa posição, o rebolo é afastado da superfície da peça e o processo de têmpera está plenamente encerrado. O ciclo de acabamento é realizado na seqüência, nas condições usuais do processo, sem a realização de dressagens intermediárias.

Ainda como proposta do trabalho, o processo de têmpera por retificação será comparado sob duas condições distintas. Na primeira série dos ensaios, o processo será executado com refrigeração, e na segunda série, o mesmo processo com manutenção de todos os parâmetros, mas abstendo-se da refrigeração, avaliando os dois processos e sua influência no material.

5. DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

Este capítulo traz a descrição dos materiais e equipamentos empregados para a realização do ensaio, bem como os métodos empregados para análise dos resultados obtidos.

5.1. MATERIAIS E CORPO DE PROVA

O corpo de prova empregado para o ensaio foi produzido a partir do aço liga ABNT 4340, cuja dureza média é de 30 HRC. Este aço foi escolhido tendo em vista que é um material de carbono médio (0,40%), e que esta quantidade não tem influência direta na obtenção da estrutura do material a ser estudado. O aço liga para beneficiamento foi escolhido por ter alta temperabilidade, e tem elementos de liga em sua composição química em percentuais determinados pelo fabricante conforme constam a Tabela 4.

TABELA 4 – PORCENTAGENS DE ELEMENTOS DE LIGA NO AÇO 4340

Elemento Químico	Símbolo	Percentuais (%)
Carbono	C	0,40
Silício	Si	0,25
Manganês	Mn	0,70
Cromo	Cr	0,80
Níquel	Ni	1,80
Molibdênio	Mo	0,25

5.2. USINAGEM DO CORPO DE PROVA

Os corpos de prova foram produzidos a partir da divisão de uma barra de aço ABNT 4340 de diâmetro 38,1mm. Durante a operação de serrar o material,

procurou-se manter a refrigeração em abundância com o objetivo da não ocorrência de danos térmicos na estrutura do material.

Na operação de usinagem para padronizar os comprimentos foram realizadas no torno convencional. A velocidade da peça (n) de 350 rotações por minuto e avanço (f) de 0,025 mm/rotação e profundidade de corte (ap) de 0,5 mm por passada. Na operação seguinte foram furados os centros com broca de centrar de 3/8"x 1/8" e avanço de 0,02 mm/rotação.

A furação dos centros das faces das peças foi necessária porque a operação de torneamento do corpo de prova propriamente dito não foi realizada com a peça sujeitada por grampo de arrasto e placa lisa, mas entre centros dos cabeçotes fixo e móvel, para manutenção da tolerância geométrica da peça.

Deve ser observado que, a não manutenção da tolerância geométrica da peça tem influência negativa aos ensaios produzidos na máquina de retificação. Até o presente momento, os copos de prova mantiveram a forma de um cilindro de diâmetro 38,1 mm e comprimento 65,0 mm.

Seguindo o processo de obtenção do corpo de prova foi elaborado um programa para o torno CNC Centur 30RS na linguagem Mach 9, empregando apenas duas ferramentas, sendo uma de desbaste e outra para sangramento do canal.

Estabeleceu-se para esta operação de usinagem, velocidade máxima (S) de 1000 rpm, o avanço (f) de 0,25 mm/rotação e a velocidade de corte (V_c) de 180m/min para obtenção da forma final do corpo de prova, de acordo com a Figura 19.

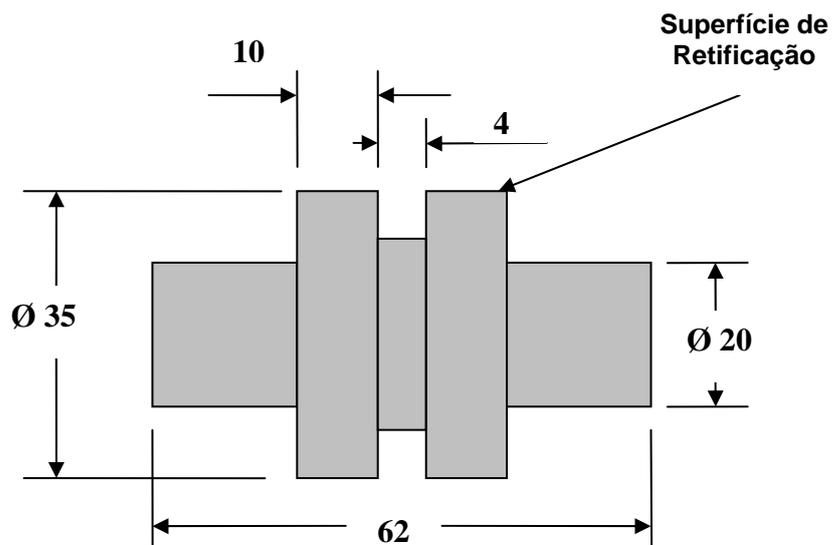


FIGURA 19 - CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE RETIFICAÇÃO

Em seguida os corpos de prova preparados foram numerados em ordem crescente, com o propósito de facilitar a identificação e tabulação dos dados obtidos durante o processo de retificação.

5.3. MÁQUINA DE ENSAIO E REBOLO

A máquina de ensaio utilizada para a têmpera por retificação foi uma retificadora cilíndrica FERDIMAT, modelo C71 CN, dotada de um CNC. Para o ciclo de têmpera, optou-se por trabalhar com a retificação de mergulho, pois é a forma mais usual empregada nas indústrias, e por ser a forma empregada por Brinksmeir *et al*, (2003) para obtenção do ensaio.

A dressagem do rebolo antes do ensaio foi realizada com dressador de ponta única. A medida do dressador não foi obtida por não dispor de meios de medição. A profundidade de dressagem foi (ad) 0,005mm e o avanço do dressador (Sd) 0,05 mm/min.

Ainda nos ensaios de têmpera, por retificação, utilizou-se de um rebolo com especificação 1A AA 80 K6 V10 recomendado pelo fabricante, tanto para afiação de ferramentas, como para retificação de diversos tipos de materiais.

Segundo o fabricante, este tipo de rebolo apresenta boa manutenção do perfil para trabalhos leves e para trabalhos mais abrasivos. As dimensões do rebolo são: 355,2 mm de diâmetro externo inicial, 50,8 mm de largura e furo com diâmetro 127,0 mm. Deve ser esclarecido também que este rebolo foi empregado em outras operações de retificação, anteriormente.

A velocidade de corte (V_s) máxima recomendada pelo fabricante para este tipo de rebolo, seguindo-se as especificações do catálogo, é de 45 m/s. Para os ensaios, esta velocidade foi mantida constante em 35 m/s, visto que é uma velocidade abaixo do limite máximo especificado e também por ser uma velocidade muito próxima a velocidades empregadas pelas indústrias de modo geral nos processos de retificação.

5.4. CICLO DE TÊMPERA

Para o ciclo de têmpera, a velocidade do rebolo (V_s) foi mantida em 35 m/s, a velocidade de avanço radial (f) em 0,05 mm/rotação. Para a profundidade de corte (a_p), estabeleceu-se 0,05mm/min. A largura (b) de ataque considera a largura da região de contato do rebolo na peça, que neste ensaio é de 10,0 mm, visto que é uma operação de mergulho. O tempo de ciclo desta operação é extremamente baixo, que para as amostras foi de apenas 9,0 segundos.

Concluído o ciclo de têmpera, inicia-se a fase de acabamento. O sistema de refrigeração é acionado mantendo-se uma vazão constante e bem localizada. A velocidade da peça é aumentada para 50 rpm e a velocidade do rebolo mantida em 35m/s, e o avanço (f) passa a ser de 0,005 mm/rotação, até atingir a dimensão de 34,8 mm. Após este ciclo, todo o processo está terminado.

Os parâmetros de entrada da máquina foram iguais no ciclo de têmpera sem e com refrigeração para não ocorrer a entrada de mais variáveis no processo, o que dificultaria o estudo proposto.

5. 5. ENSAIOS DE DUREZA

Para análise da dureza superficial e micro dureza foi usado um laboratório nesta área, situado na região de Piracicaba. As amostras foram assessoradas pelo técnico e proprietário deste laboratório e acompanhadas pelo autor.

5.5.1. ANÁLISE DA DUREZA SUPERFICIAL (HRC)

O equipamento utilizado para a medição da dureza Rockwell C foi, um durômetro Microtest modelo 737, sendo a sua última aferição realizada em 13/09/2005.

No equipamento empregado no ensaio de dureza, deve-se observar que o durômetro deve estar munido de penetrador convenientemente alojado e de um aplicador de pressão, e um padrão de dureza, que normalmente é de 60 HRC.

Antes de iniciar o ensaio, foi verificado se a carga da máquina estava de acordo com o ensaio HRC a ser efetuado de 150Kgf. Depois, verificou-se, também se a máquina estava dentro dos padrões, realizando ensaio no padrão de 60 HRC, que acompanha a máquina.

É sempre importante aferir a máquina antes de qualquer medição. Das três medições efetuadas, o resultado igualou-se com o padrão, demonstrando que a máquina está adequada para medição da dureza.

O suporte plano da peça da máquina foi substituído por um suporte em (V) para dar maior apoio ao corpo de prova quando da aplicação da carga. Como a superfície do corpo de prova é retificada, não é necessário executar a

preparação. A aplicação da pré-carga é executada até o ponteiro do relógio da máquina estabilizar-se.

Em seguida, foi aplicada a carga aguardando o tempo médio de 15 segundos até a parada do ponteiro. Após esse tempo, a carga foi retirada e efetuada a leitura no relógio da máquina, sendo os dados anotados.

As medições da dureza superficial foram realizadas baseando se num sistema circular, com afastamento entre cada medição de 90°. Portanto o resultado apresentado é a média de quatro medições com seu respectivo desvio padrão.

5.5.2. ANÁLISE DA MICRODUREZA

O equipamento utilizado para tal análise foi um micro durômetro Micro Teste MV ano e fabricação 1998, modelo HL, aferido segundo o procedimento de aferição em 02/08/2005.

Para a realização de uma boa análise de microdureza, é de fundamental importância a preparação das amostras retiradas dos corpos de prova para ensaios micrográficos.

O procedimento para preparação das amostras é o polimento mecânico com o objetivo da remoção de alguns *microns* da camada superficial do material, observando-se a isenção de riscos e marcas profundas.

Como as amostras a serem analisadas são de pequenas dimensões, deve ser feito o embutimento em baquelite com o propósito de boa fixação e manutenção de sua superfície perpendicular ao penetrador do instrumento.

A norma ASTM E384-99 define o procedimento para realização do ensaio em:

- √ Ligar a iluminação do aparelho;
- √ Selecionar o penetrador desejado observando que o penetrador esteja limpo e isento de cargas estáticas;
- √ Promover a fixação do corpo de prova no aparelho (amostra a ser analisada), mantendo a sua superfície perpendicular ao eixo de trabalho do penetrador;
- √ Regular o foco do microscópio utilizando a menor ampliação possível de imagem;
- √ Ajustar a intensidade da luz e a abertura dos filtros do aparelho para se obter a melhor imagem;
- √ Selecionar a área de medição para determinação da dureza antes da aplicação da carga;
- √ Aplicar a pré-carga de acordo com o especificado na norma E384-99;
- √ Decorrido o tempo de penetração, retirar a carga e colocar o aparelho no modo de medição, selecionando as lentes adequadas;
- √ Verificar a impressão quanto à simetria de suas diagonais de impressão;
- √ Se a impressão apresentar-se em bom estado, executar a medição das diagonais obtendo o valor médio;
- √ Calcular a micro dureza empregando a equação 1;
- √ Tomar nota dos valores obtidos.

Segundo Souza (1982), quando empregada carga muito baixa, pode ocorrer pequena recuperação elástica do material, que também podem produzir impressões muito pequenas que dificultam a medição das diagonais (L) por ser difícil de identificar os cantos das diagonais da impressão, podendo os resultados indicar valores de dureza menores que o verdadeiro.

É importante que, no caso de dificuldades de leitura, seja feita a repetição dos ensaios, e que a distância entre as impressões deve ter em média, três vezes o valor do comprimento da diagonal.

5.6. ANÁLISE DA RUGOSIDADE Ra (μm)

O rugosímetro é um aparelho eletrônico amplamente empregado nas indústrias para verificação de superfícies quanto à rugosidade. Na realização dos ensaios para verificação das superfícies dos corpos de prova, foi utilizado um rugosímetro digital portátil da marca Mitutoyo Surftest 211.

O processo de determinação da rugosidade consiste, basicamente, em percorrer a superfície da peça com o apalpador de formato normalizado, acompanhado de uma guia em relação ao que se move verticalmente.

Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado no mostrador.

As medições foram feitas de acordo com a norma DIN 4762. As verificações foram efetuadas em etapas diferenciadas. Na primeira, as verificações foram realizadas com os corpos de prova apenas com a superfície temperada por retificação. Na segunda etapa, os corpos de prova foram retificados em ciclo de acabamento.

Durante o processo da retificação de acabamento, manteve-se o fluido de refrigeração em abundância, para a não ocorrência de danos térmicos na superfície temperada por retificação.

Para cada superfície de retificação, foram feitas três medições de rugosidade, sendo o afastamento de cada medição aproximadamente 120° . O resultado apresentado de cada superfície de verificação é a média das três medições com seu respectivo desvio.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nas análises desenvolvidas. Os resultados obtidos estão baseados nos procedimentos que foram descritos no capítulo anterior. Para melhor entendimento, estas análises e discussões serão tratadas individualmente.

6.1. DUREZA SUPERFICIAL

Com os resultados obtidos, foram geradas planilhas e gráficos, para melhor entendimento do trabalho. Estes resultados foram compilados separadamente tendo em vista que o procedimento foi desenvolvido sobre duas condições distintas de usinagem. A primeira é a condição com dados obtidos na condição sem refrigeração, a segunda na condição com refrigeração. Todos os dados coletados foram transferidos para a planilha do Excel e gerados através do software SAS/LAB.

Inicialmente, foi elaborado um estudo de suposições para a análise de variância com o objetivo de se avaliar a pertinência da aplicação desta técnica de análise de dados, e os resultados são fragmentados e comentados em seguida.

Numa primeira abordagem dos dados de dureza, foi apontado pelo SAS/LAB, a existência de um valor discrepante dentre os valores de dureza e que merece ser avaliado, pois valores discrepantes podem ser bastante prejudiciais à análise. O valor discrepante trata-se de uma amostra do grupo “sem resfriamento”, na qual observou-se uma dureza de 39 HRC, um valor muito baixo em relação a todos os demais valores de dureza observados. Sugere-se, desta forma, a exclusão deste dado à elaboração de um novo estudo, a fim de avaliar a eficácia desta medida corretiva.

No processo de têmpera “com refrigeração”, em momento algum o rebolo tocou a peça sem refrigeração. Procurou-se manter um volume de fluido de corte suficiente para manter o sistema refrigerado. Pode-se identificar que, com o processo refrigerado a dureza superficial (HRC) se manteve dentro de um limite em linha reta, quebrado apenas por uma discrepância do corpo de prova identificado.

Esta diferença pode ser explicada porque o corpo de prova não foi obtido em uma única operação de torneamento. Quando montado entre pontos na máquina retífica, ocorreu erro do batimento radial da peça. Este desvio provocou, durante a retificação, uma menor penetração do rebolo, e que, talvez não tenha atingido a temperatura superficial suficiente para a ocorrência da transformação de fase do material.

Esta ocorrência é determinada como erro composto, que é, constituído do desvio de batimento radial, adicionado ao erro decorrente da variação de posição do centro da peça.

Para o processo sem refrigeração, as durezas superficiais dos corpos de prova foram ainda menores. Na têmpera sem refrigeração, a transformação da estrutura do material é mais lenta que no processo com refrigeração. Neste processo, o resfriamento da peça é realizado ao ar, e o tempo decorrente para esta transformação, principalmente para o aço liga ABNT 4340, é grande, e que devido os elementos constituintes da liga depende apenas da temperatura a que foi submetido.

Realizando uma comparação das durezas médias superficiais entre o processo com refrigeração e sem refrigeração, nota-se que os dois processos caminham paralelos na escala de dureza, sendo que, no processo com refrigeração as durezas superficiais são pouco mais elevadas como mostra a Figura 20.

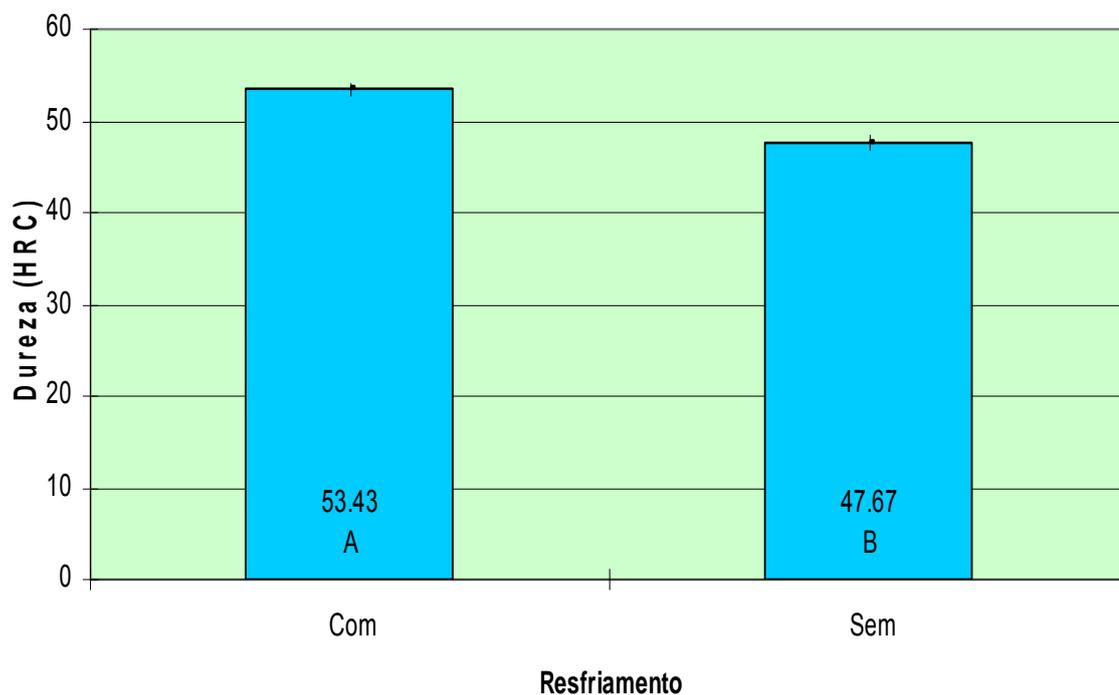


FIGURA 20 - COMPARAÇÃO DA DUREZA HRC ENTRE PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO E SEM REFRIGERAÇÃO DE 14 AMOSTRAS

A avaliação do intervalo revela coerência em relação aos resultados observados na análise, uma vez que não há sobreposição dos intervalos de confiança. Conclui-se, desta forma, que a média verdadeira da dureza do material que recebe tratamento com refrigeração é significativamente maior que a do material que não recebe o resfriamento.

Conforme o apresentado na Figura 20 no processo com refrigeração mostra como valor médio das durezas superficiais 53,43 HRC, enquanto que no processo sem refrigeração a dureza superficial foi de 47,67 HRC. Analisando o desvio entre as médias da dureza conclui-se, que, a dureza obtida pelo processo refrigerado foi de 6,76 HRC maior que o processo não refrigerado.

6.2. RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Como descrito no capítulo anterior, as verificações da rugosidade superficial dos corpos de prova foram realizadas em duas etapas distintas. Logo após o processo de tempera por retificação todos os corpos de prova passaram pela medição da rugosidade superficial.

Como cada corpo de prova dispõe de duas superfícies de usinagem, foram realizadas seis medições de rugosidade para cada peça, com pontos distantes circularmente em 120°. Tanto o instrumento como a peça, foram apoiadas corretamente para evitar erros de medição. O instrumento de medição foi ligado e o *cut-off* calibrado para 2,5 mm, no padrão ISO e parâmetro Ra. Antes das medições, verificou-se a leitura da escala Ra com o padrão que acompanha o instrumento. As medições foram realizadas em corpos de prova temperados com refrigeração, os valores médios encontrados antes do acabamento final estão descritos na Tabela (5).

Tabela 5 - Rugosidade Média Ra (μm) Ciclo de Têmpera Processo com Refrigeração

Corpos de Prova	Rugosidade Média Ra μm
11	2,1
12	2,3
13	1,9
16	1,9
17	2,1
18	2,3
19	2,1

Para as medições realizadas em corpos de prova temperados sem refrigeração, os valores médios encontrados antes do acabamento final estão descritos na Tabela (6).

Tabela 6 - Rugosidade Média Ra (μm) Ciclo de Têmpera Processo sem Refrigeração

Corpos de Prova	Rugosidade Média Ra μm
01	2,7
02	2,5
03	2,9
04	2,7
05	2,5
07	2,8
09	2,7

Na etapa seguinte, os corpos de prova foram submetidos a um processo de retificação de acabamento final, mantendo-se a velocidade do rebolo (V_s) em 35 m/s e profundidade de corte (a_p) de 0,05mm e a rotação da peça foi aumentada para 50 rpm.

Durante todo processo de retificação de acabamento houve a manutenção do sistema de refrigeração, ou seja, foi realizado empregando-se refrigeração abundante com o propósito de não ocorrências de danos superficiais, ou internos, das amostras a serem ensaiadas.

Os corpos de prova foram novamente submetidos à medição da rugosidade superficial seguindo-se os mesmos procedimentos anteriores, e os valores médios das medições estabelecidos conforme Tabelas (7) e (8).

Tabela 7- Rugosidade Média Ra (μm) Processo com Refrigeração acabamento final.

Corpo de Prova	Rugosidade Média Ra (μm)
11	0,9
12	0,8
13	0,9
16	0,9
17	0,8
18	0,8
19	0,9

Tabela 8 - Rugosidade Média Ra (μm) Processo sem Refrigeração acabamento final.

Corpo de Prova	Rugosidade Média Ra (μm)
01	0,8
02	0,9
03	0,9
04	0,8
05	0,9
07	0,9
09	0,9

Os dados das Tabelas permitiram a construção da Figura 21 para melhor entendimento da rugosidade durante a operação de têmpera para a condição com refrigeração e sem refrigeração.

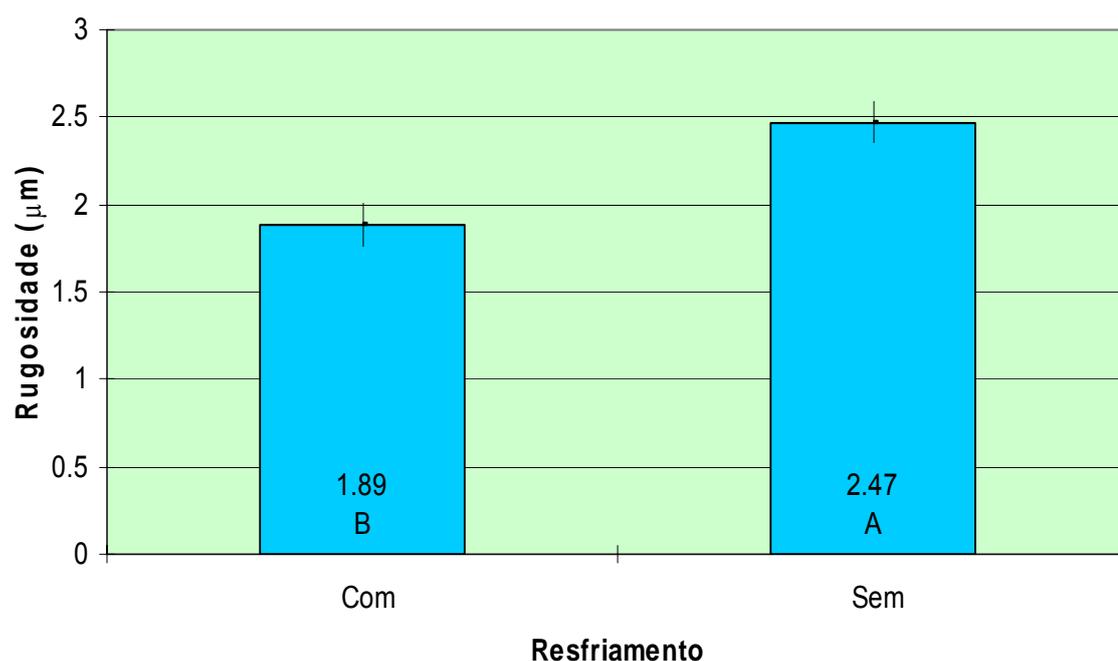


FIGURA 21 – MÉDIAS DA RUGOSIDADE DA TÊMPERA (Ra) NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.

A abstenção do refrigerante gera maior temperatura e atrito na região de contato peça e rebolo. Parte deste atrito é proveniente do próprio material que está sendo arrancado que se acumula nos interstícios dos grãos do rebolo que por falta de refrigeração, não são removidos.

Conclui-se, desta forma, que o valor de Ra é maior nos corpos de prova “sem refrigeração” enquanto que, nos corpos de prova “com refrigeração”, os valores encontrados de Ra, foram menores.

Ainda na análise de Ra, foram efetuadas as médias dos valores encontrados após o processo de acabamento final, mantendo-se as mesmas condições de

processo para os 14 corpos de provas, ou seja, empregando-se as mesmas velocidades, cujos valores estão demonstrados na Figura 22.

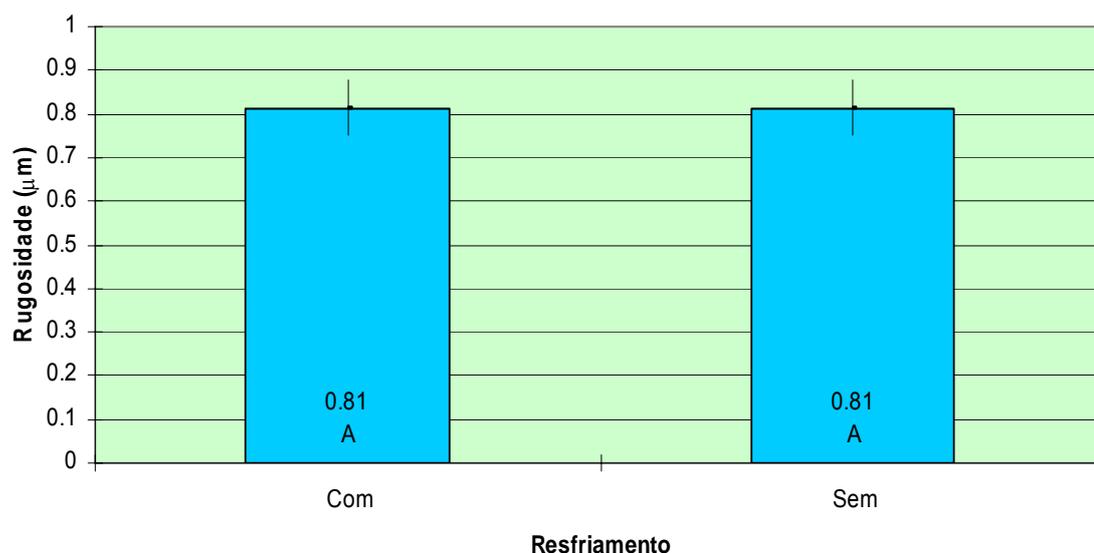


FIGURA 22 – MÉDIAS DA RUGOSIDADE APÓS O ACABAMENTO (R_a) NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.

Quando os valores de acabamento são confrontados, pode se concluir que a rugosidade final obtida pelos dois processos apresenta média e desvios praticamente de mesmo valor, não importando, contudo, os valores anteriormente encontrados.

Isto significa que apesar do processo com refrigeração e sem refrigeração anteriormente apresentaram rugosidades diferenciadas, mas mesmos não são evidentes após o acabamento. Conclui-se então, que a rugosidade de acabamento final de retificação é independente da rugosidade do processo anterior.

6.3. MICRO DUREZA

As medições de micro dureza Vickers (MV1) foram realizadas de acordo com a norma ASTM-E384-99. Para esta análise, procurou-se manter as distâncias mínimas entre impressões estabelecidas pela norma em 28 amostras, anteriormente preparadas para esta finalidade. A carga utilizada para medição das amostras foi de 1,0 Kg que está de acordo com a norma. Segundo esta norma, a distância mínima entre impressões deve ser três vezes maior que a diagonal (D) média da impressão, como mostra a Figura 23 com aplicação da carga em um único ponto.

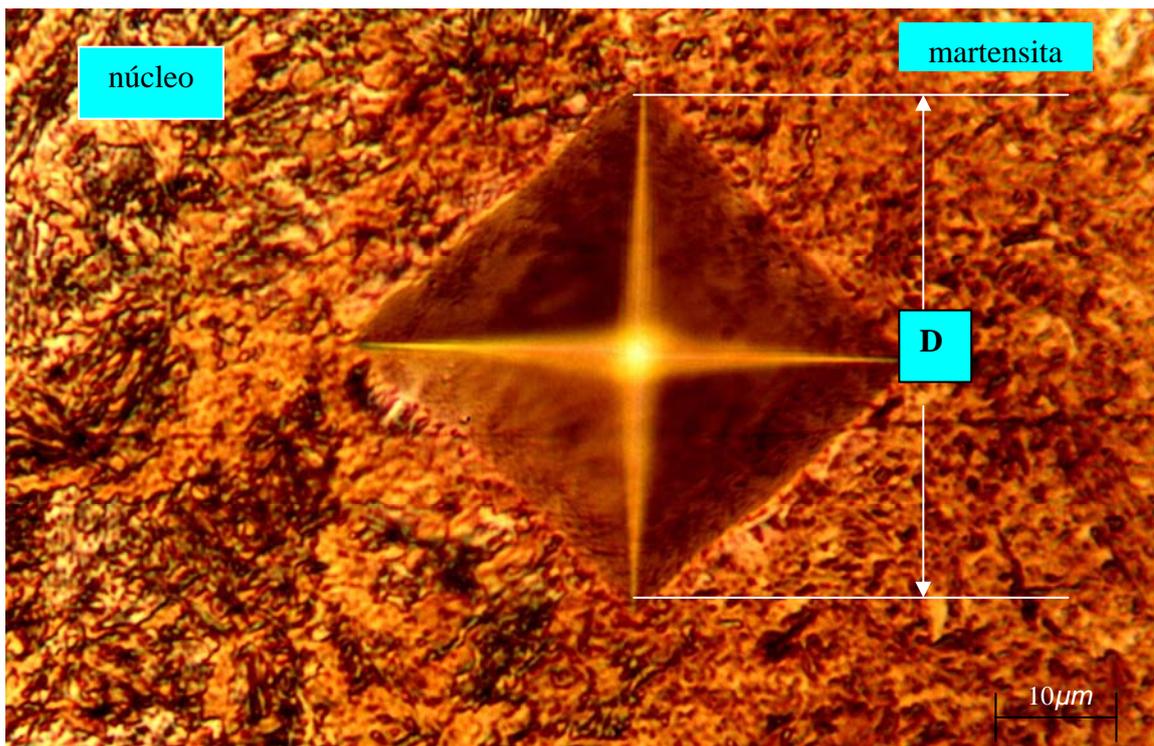


FIGURA 23 – IMPRESSÃO MICRO VICKERS E DIAGONAL (D)

Com o propósito de se manter um padrão na aplicação da carga, as impressões foram realizadas exatamente em cima da linha estabelecida pelo

instrumento. Para melhor entendimento do processo deste ensaio, a Figura 24, traz a imagem do corpo de prova que foi submetido pela análise de micro dureza. Nota se claramente que as impressões estão posicionadas em linha reta e os tamanhos das impressões são diferentes à medida que se caminha para o centro da peça.

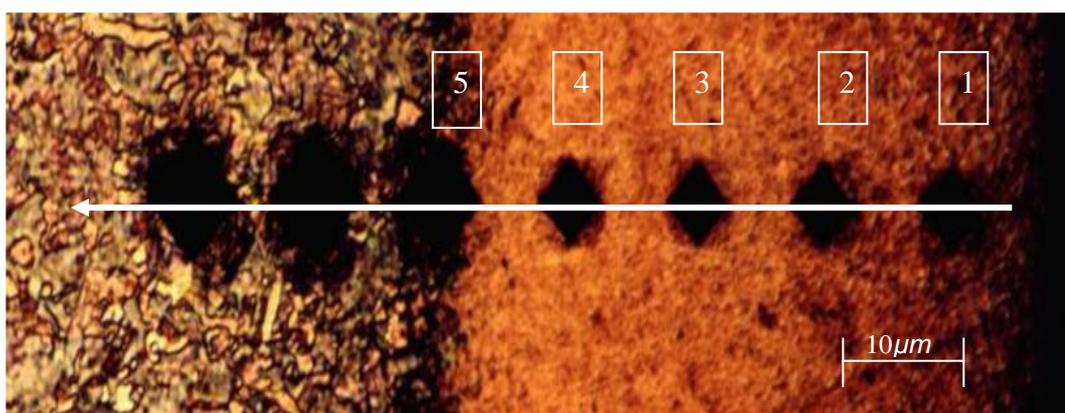


FIGURA 24 – IMPRESSÃO MICRO VICKERS

Como a superfície foi temperada por retificação, a região externa com estrutura transformada apresenta uma dureza maior. Como a carga aplicada é mantida constante o tamanho da impressão é menor como mostra a Figura 26. À medida que estas impressões caminham para o centro da peça o tamanho da impressão vai aumentando e a dureza diminuindo, ou seja, quando o tamanho da impressão aumenta a dureza diminui proporcionalmente. O intervalo de medição foi de 0,01 mm entre as impressões.

Os resultados obtidos pela análise de micro dureza foram transportados para planilhas no Excel e gráficos através do programa computacional SAS/LAB com o objetivo de auxiliar no estudo do comportamento das durezas encontradas na série de corpos de prova.

Também a micro dureza recebeu um tratamento diferente na análise de dados em função da existência de medidas repetidas, ou seja, cada uma das amostras teve as micro durezas avaliadas a cada 0,10mm, o que gera uma condição diferente das anteriores e que permite a avaliação da profundidade como diferentes condições.

Nesta abordagem, serão consideradas duas causas de variação: o do tratamento térmico e a profundidade de têmpera, sendo que a segunda refere-se às diferentes variáveis coletadas. Para este estudo, foi descartada a utilização da medida de micro dureza na profundidade de 0,70mm, pois somente um dos tratamentos teve avaliação nesta profundidade.

Em um primeiro momento, serão avaliadas as suposições referentes a cada uma das variáveis de resposta: micro dureza a 0,10; micro dureza a 0,20; micro dureza a 0,30; microdureza a 0,40; micro dureza a 0,50; micro dureza a 0,60 mm.

Para a condição do processo com refrigeração, as médias de microdurezas são apresentados na Tabela 9. Verifica-se que ocorreram dois valores discrepantes com os corpos de prova: o corpo de prova de identificado como número 4, na profundidade de 0,30 mm a média da dureza foi de 410 MV, e no corpo de prova número 9, na profundidade de 0,40 mm a dureza foi de 547 MV.

TABELA 9 - MICRO DUREZAS MÉDIAS CORPOS DE PROVA COM REFRIGERAÇÃO

Profundidade em (mm)	Médias Micro Durezas corpos de prova Com Refrigeração						
	1	2	3	4	5	7	9
0,10	680	665	690	672	683	675	689
0,20	650	642	663	655	661	660	655
0,30	570	635	645	410	640	615	632
0,40	380	359	383	390	330	370	547
0,50	330	353	361	305	368	350	368
0,60	305	308	300	297	300	310	330

Observa-se, que os valores obtidos como sendo potencialmente discrepante. A medida de 547 MV e 410 MV são realmente diferente das demais no corpo de prova identificado como 4, e maior no corpo de prova identificado como 9. Entretanto, estes valores não podem ser considerados como excessivamente baixo ou alto, pois podem ter ocorrido erros de medição devido ao grande números de medições.

Para o processo sem refrigeração, os indícios de problemas são as micro durezas observadas nas profundidades de 0,20mm e 0,30mm, e não são observados indícios de problemas nas demais profundidades. Inicialmente foram listados os valores possivelmente discrepantes de micro dureza, e foram encontrados no corpo de prova número 19 nas profundidades de 0,20 mm, e 0,30 mm a partir da superfície Tabela 10.

TABELA 10 - MICRO DUREZAS MÉDIAS CORPOS DE PROVA SEM REFRIGERAÇÃO

Profundidade em (mm)	Médias Micro Durezas corpos de prova Sem Refrigeração						
	11	12	13	16	17	18	19
0,10	653	658	669	651	658	661	643
0,20	630	625	632	610	636	635	590
0,30	360	372	381	320	344	343	545
0,40	353	350	359	305	329	320	310
0,50	305	305	305	291	301	305	282
0,60	293	290	305	291	300	290	282

Observa-se que este valor obtido como sendo potencialmente um valor discrepante. A medida de 590 MV, realmente é um pouco diferente das demais por ser a menor de todas, entretanto, este valor não pode ser considerado como excessivamente baixo, pois há uma outra medida de 610 MV, muito próxima a esta. Há também de se considerar a ocorrência de possíveis erros de medição e erros na coleta dos dados desta observação. Também há que se considerar que esta medida está no grupo de menor média. Tendo em vista o impacto que este valor poderia causar na análise, optou-se pela manutenção do mesmo e não a sua exclusão.

Na profundidade de 0,30mm por sua vez, observa-se fortes indícios de que o valor 545 MV também é outro fator discrepante dos dados da amostra, mas que deve ser considerado. Mais uma vez pode-se denotar problema com a amostra e não apenas com as medidas coletadas individualmente, pois duas medidas de micro dureza se revelam fora do padrão (0,20 e 0,30 mm). Por fim, foram avaliadas as suposições relacionadas às medidas de micro dureza a 0,40mm de profundidade.

Diante dos problemas detectados e do pequeno número de repetições do experimento, há que se considerar o risco e os prejuízos decorrentes da exclusão de observações. Ao invés de se excluir os dados, optou-se que os mesmos sejam mantidos mesmo que isto represente um outro risco, o da potencial influência excessiva destes valores nos resultados finais.

O resultado da análise de variação com medidas repetidas são apresentados das análises de variância das medidas de micro dureza Tabela 11.

TABELA 11 - VALORES MÉDIOS DA MICRO DUREZA X PROFUNDIDADE EM (MM)

Microdureza 0,10 mm	Microdureza 0,20 mm
R-Quadrado : 0,601999	R-Quadrado : 0,647372
C.V. : 1,299813	C.V. : 2,032158
Valor-P : 0,0003	Valor-P : 0,0005
Microdureza 0,30 mm	Microdureza 0,40 mm
R-Quadrado : 0,846003	R-Quadrado : 0,309672
C.V. : 11,19354	C.V. : 14,31042
Valor-P : <0,0001	Valor-P : 0,0388
Microdureza 0,50 mm	Microdureza 0,60 mm
R-Quadrado : 0,720277	R-Quadrado : 0,479125
C.V. : 3,896249	C.V. : 3,896249
Valor-P : 0,0061	Valor-P : 0,0061

Observa-se, inicialmente, uma grande variação nos valores dos coeficientes de determinação, desde valores bastante satisfatórios, tais como 0,846003 no caso de micro dureza observada na profundidade de 0,30mm, até valores pouco satisfatórios como o 0,3090 observado na profundidade de 0,40mm.

Em vista da grande possibilidade de controle sobre o material, da precisão dos procedimentos empregados e da inexistência de fatores pouco controláveis, seriam desejados coeficientes de determinação superiores a 70%. Os valores baixos devem ser observados como indicadores de falta de controle no material ou no processo.

Independentemente disto, todavia, em todas as profundidades há indícios, como na profundidade de 0,40mm, da existência de diferenças entre micro durezas, o que conduz à necessidade de comparação das médias de micro dureza em cada profundidade, o que é ilustrado Figura 25.

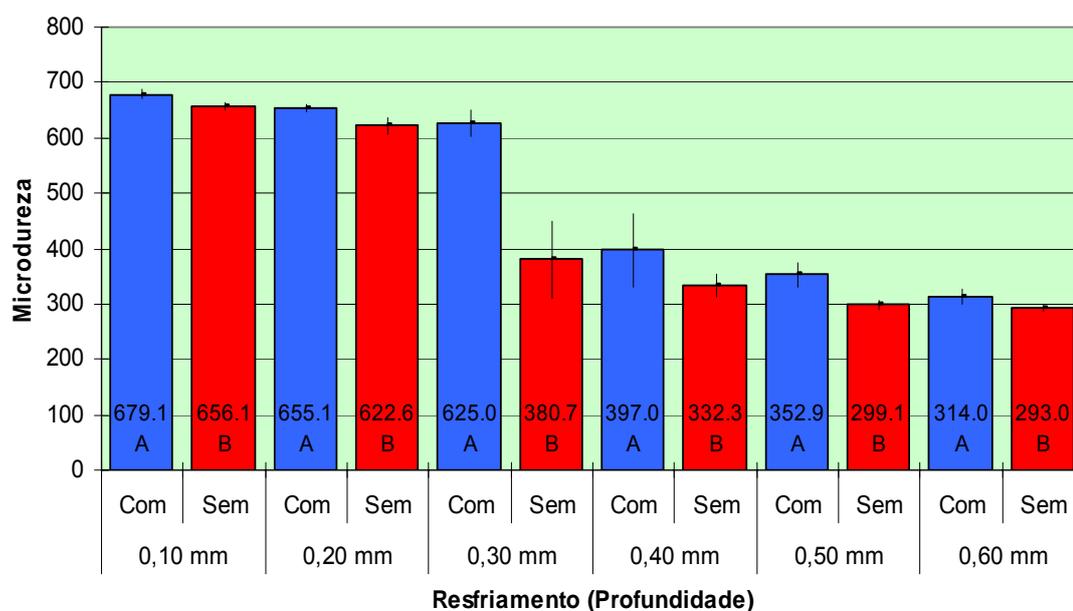


FIGURA 25 – MÉDIAS DE MICRO DUREZA NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO

Observa-se, em todas as profundidades, médias de micro dureza significativamente maiores nos tratamentos com resfriamento que nos tratamento sem resfriamento. Esta análise permite a comparação dos efeitos das profundidades sobre a dureza de medidas repetidas, e são apresentados testes associados ao efeito de profundidade.

Para o processo de têmpera com refrigeração, foi possível a obtenção de micro durezas médias variando de 620 MV a 690 MV até a profundidade de 0,30 mm.

A partir desta profundidade de 0,30mm é que, a micro dureza cai abruptamente para 400 MV na profundidade de 0,40 mm. Esta ocorrência pode ser explicada como a técnica para determinar a endurecibilidade que consiste o ensaio Jominy da extremidade temperada.

Segundo Callister (2002), esse procedimento, à exceção da composição da liga, todos os demais fatores, podem influenciar a profundidade até a qual uma peça endurece, isto é, o tamanho da amostra, e se tratamento por têmpera é mantido constante. Quando um corpo de prova cilíndrico é austenitizado a uma temperatura pré-determinada durante um período de tempo predeterminado.

Após a remoção do forno, o corpo de prova é montado sobre um suporte, e a extremidade inferior resfriada rapidamente, mediante a ação de um jato de água com vazão e temperaturas específicas.

Dessa forma, a taxa de resfriamento assume um valor máximo na extremidade que está sendo temperada, diminuindo em função da posição desde esse ponto e ao longo do comprimento do corpo de prova (CALLISTER, 2002).

Durante as medições de dureza Rockwell a cada 1,6 mm ao longo do corpo de prova, a extremidade temperada, e resfriada mais rapidamente, exibe a maior dureza; para a maioria dos aços, o produto nessa posição é 100% de martensita. A taxa de resfriamento diminui em função do aumento da distância até a extremidade resfriada, e a dureza também diminui (CALLISTER, 2002).

A Figura 26 representa a evolução das médias ao longo das profundidades.

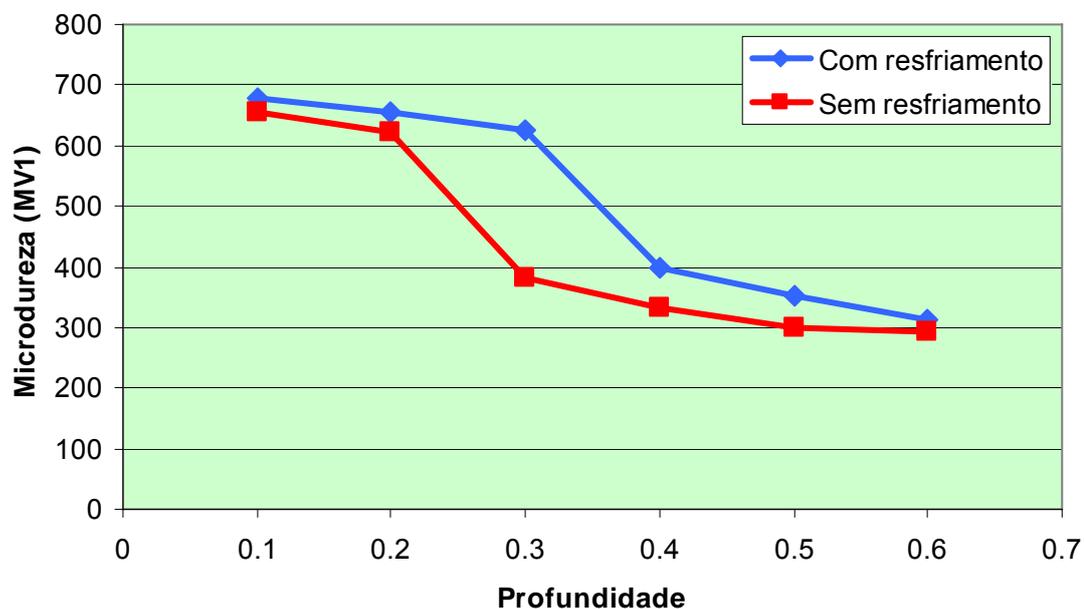


FIGURA 26 – MÉDIAS DE MICRO DUREZA NAS DUAS CONDIÇÕES DE RESFRIAMENTO.

Para o processo sem resfriamento, as médias das durezas foram mantidas entre 615 MV e 665 MV até a profundidade de 0,20mm, decrescendo rapidamente para durezas médias inferiores a 390 MV na profundidade de 0,30 mm. Isto pode ser explicado pela diminuição da taxa de resfriamento.

Segundo Callister (2002), com a diminuição da taxa de resfriamento, mais tempo fica disponível para a difusão do carbono e a formação de uma maior proporção de perlita, mais mole, que pode estar misturada com martensita e bainita. Desta forma, um aço que é muito endurecível irá reter grandes valores de dureza ao longo de distâncias relativamente longas, e um aço pouco endurecível não irá reter grandes valores de dureza. Além disso, cada liga de aço possui a sua própria e exclusiva curva de endurecibilidade.

A Figura 26, permite ainda verificar o declínio da dureza ao longo da profundidade, com uma variação mais forte na profundidade de 0,30 mm. Observa-se, ainda, que a queda é menos abrupta no grupo que recebeu o resfriamento.

6.4. ESTRUTURA TRANSFORMADA

A martensita é uma estrutura monofásica que não se encontra em equilíbrio, resultante de uma transformação sem difusão da austenita. Na têmpera por retificação, ocorreu a transformação da estrutura do material que antes do processo era austenita e perlita para uma estrutura 100% austenita. Na Figura 27, podem ser verificadas duas estruturas e uma zona de transição que sofre influência dupla de calor, justamente onde ocorre a sobreposição da estrutura. Na região mais externa até uma profundidade de 0,80 mm a estrutura é 100% martensítica, e mais para o núcleo, a manutenção da estrutura de austenita e perlita.

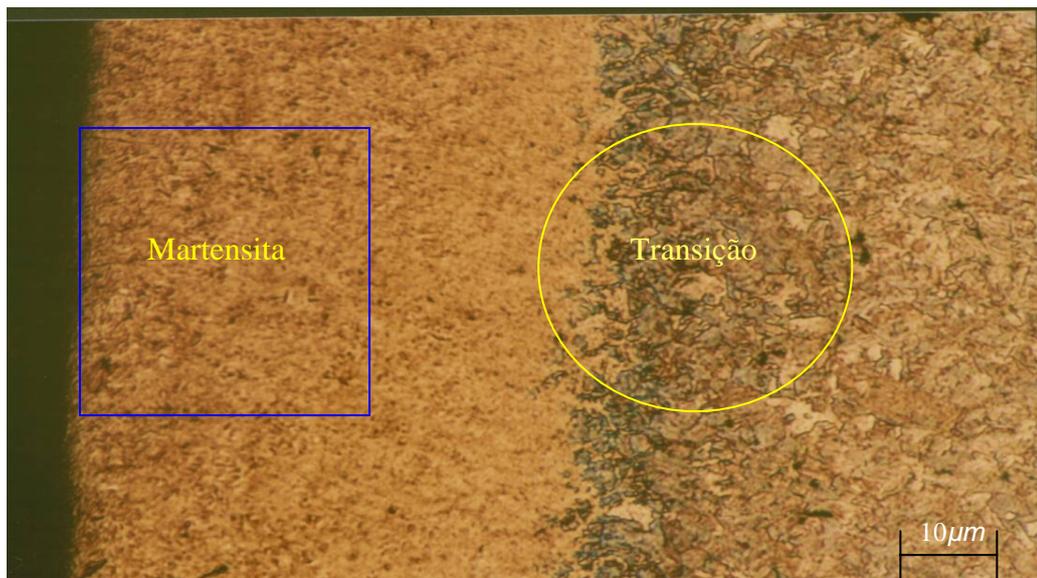


FIGURA 27 – ESTRUTURA DO CORPO DE PROVA PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO

Na Figura 28, observa-se a estrutura transformada martensítica que se apresenta na região externa de contato do rebolo durante o processo onde ocorreram a deformação dos grãos do material, pela falta de refrigeração. Esta deformação foi produzida pela forças de atrito peça e rebolo, e também pela

alta temperatura na região. Esta deformação gerou rugosidades maiores como a descrito no capítulo anterior.

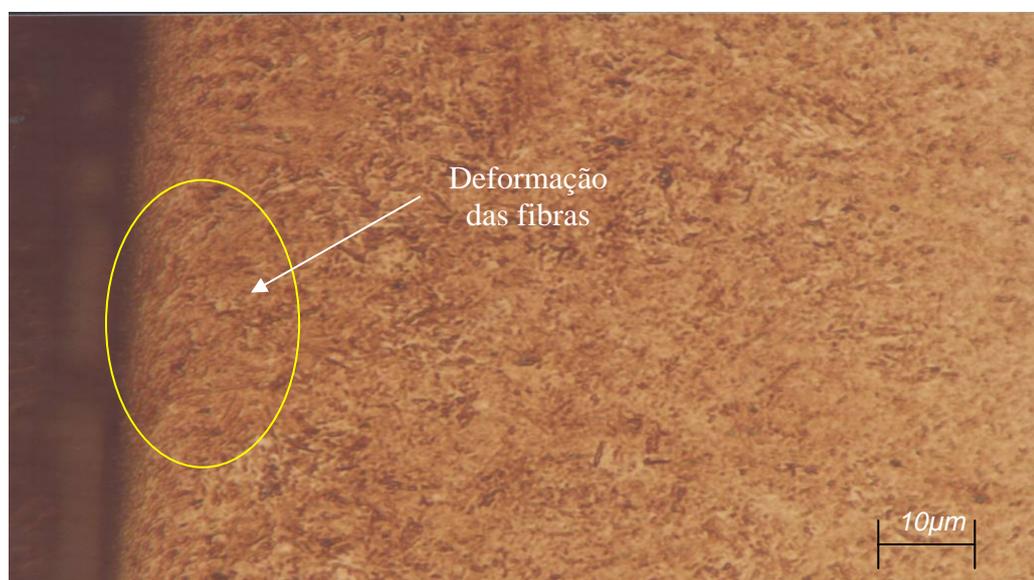


FIGURA 28 – ESTRUTURA DO CORPO DE PROVA PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO

O processo de têmpera com refrigeração produziu uma camada temperada de 0,60mm, enquanto que no processo sem refrigeração esta camada foi de 0,80mm. Apesar da profundidade sem refrigeração ser maior que com refrigeração, as durezas médias com refrigeração apresentaram se maiores.

Todas as peças que foram temperadas apresentaram três zonas distintas: uma camada superficial com dureza mais elevada do que o núcleo, uma zona de transição e uma zona de núcleo com dureza nitidamente menor que a zona superficial.

A Norma DIN 51190, parte 2, estabelece a profundidade de têmpera como sendo Rht, a que abrange a camada superficial, e a parte seguinte da zona de transição até atingir a dureza limite HG. Via de regra HG representa um valor

de ordem de 80% da dureza superficial mínima, expressa em MV, que é o respectivo valor de dureza limite.

Para o processo da têmpera quando empregada com refrigeração, à dureza MV superficial a 0,10mm foi de 679,1 MV, e considerando os 80% estabelecido pela norma, nos revela a dureza de 543,28 MV de acordo com a Figura 29.

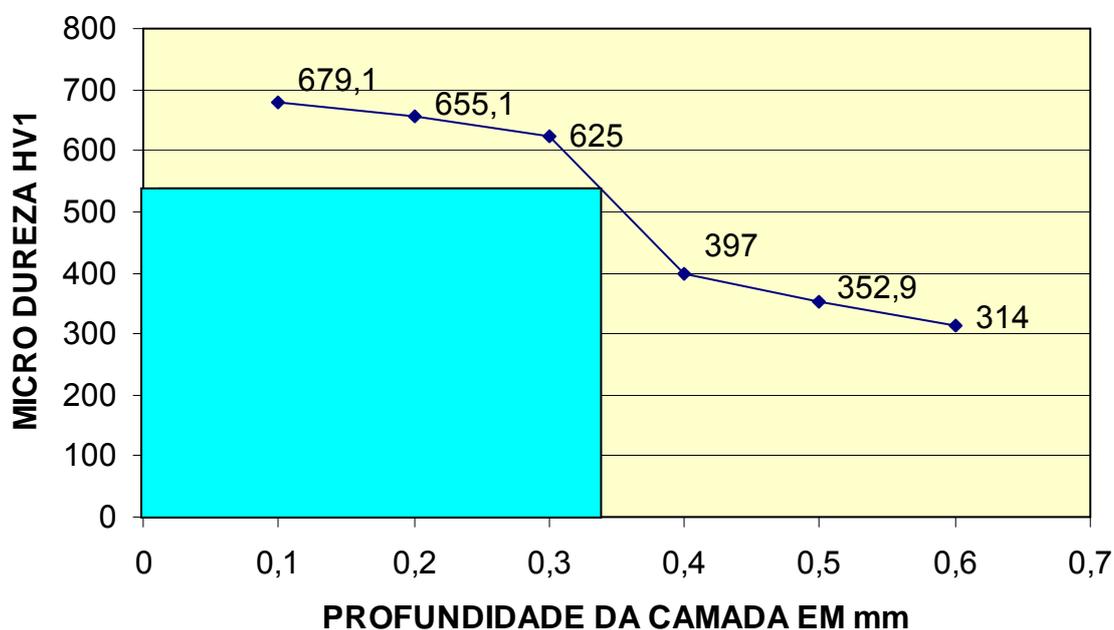


FIGURA 29 – CAMADA EFETIVA RHT PROCESSO COM REFRIGERAÇÃO

Para o processo da têmpera sem refrigeração, a dureza MV superficial a 0,10mm foi de 656,1MV, e considerando os 80%, estabelecido pela norma, nos revela a dureza 524,88 MV, de acordo com a Figura 30.

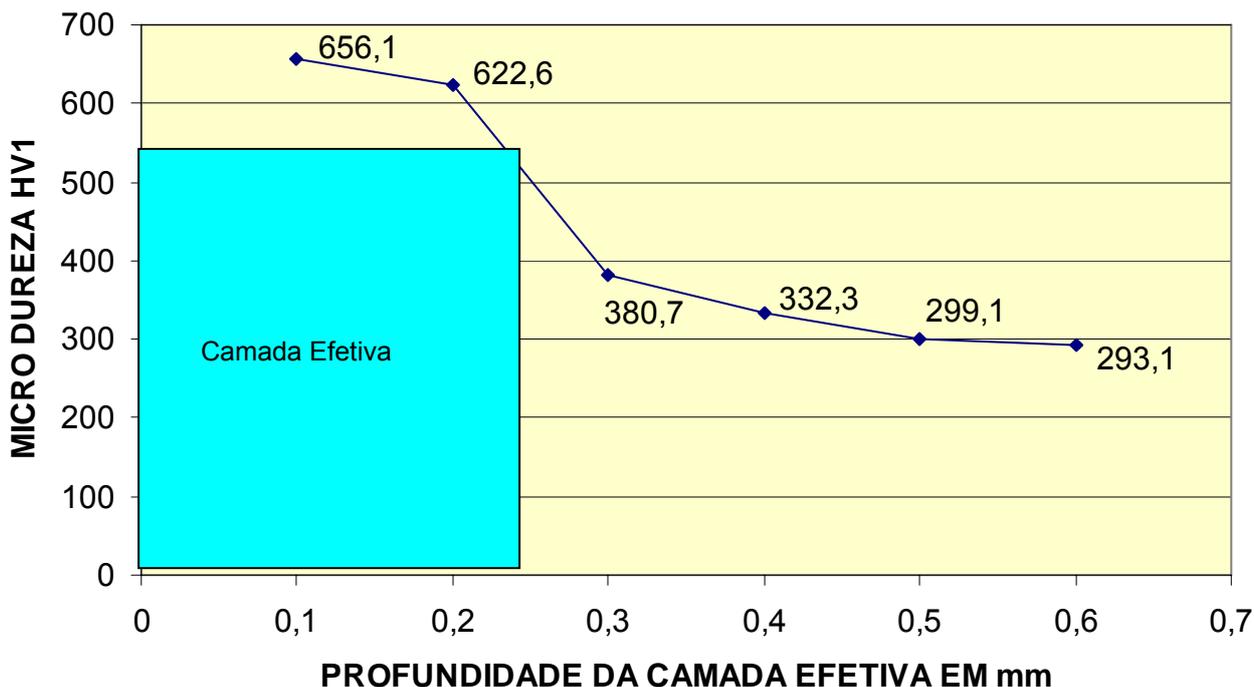


FIGURA 30 – CAMADA EFETIVA RHT PROCESSO SEM REFRIGERAÇÃO

Assim, as diferenças entre os processos, de têmpera por retificação, está na camada Rht. Para o processo com refrigeração a camada efetiva projetou-se maior, com espessura de 0,36mm, enquanto que no processo sem refrigeração, esta mesma camada foi de apenas 0,23mm.

Desta forma, fica evidente que o processo de têmpera com resfriamento, é mais eficiente que o processo sem resfriamento. Ocorre que a taxa de resfriamento depende da extração de energia térmica, a qual, por sua vez, é uma função do tempo de resfriamento que está em contato com a superfície da amostra.

No processo de têmpera sem refrigeração, como processo de extração de energia, foi empregado o ar, cuja taxa de resfriamento é menor que a água, empregada no processo com refrigeração, que consegue atingir altas taxas de resfriamento em tempos muito pequenos, confirmado os fatores de influência, tempo, temperatura e transformação.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- na têmpera por retificação, com a escolha correta dos parâmetros de entrada, é possível atingir reprodutibilidade das camadas, quer seja no processo com refrigeração ou sem refrigeração;
- a análise confrontada entre os dois processos diferenciados com refrigeração e sem refrigeração mantiveram-se estáveis durante as avaliações dos MmdQ;
- a variação da dureza superficial HRC, a dureza MV, no processo de têmpera com refrigeração, projetou-se maior porque o fluido refrigerante aumenta a velocidade de resfriamento, diminuindo o tempo de transformação e, conseqüentemente, ocorre aumento da dureza;
- a camada realmente efetiva de têmpera considerada pela norma DIN 51190 é maior no processo com refrigeração .
- a rugosidade superficial gerada pela operação de têmpera não tem influência direta na rugosidade do acabamento final;
- no processo de têmpera, devido às forças e profundidades de corte, a topografia do rebolo é alterada, mas esta alteração não chega a exigir dressagens intermediárias entre retificações, e nos rebolos puderam ser vistas inclusões de cavaco;

Sugestão Trabalhos Futuros

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

- análise do gradiente de temperatura do material pós retificação, seguida da verificação da tensão residual das camadas realmente efetivas;
- análise mais aprofundada do processo de têmpera por retificação com o emprego de outros materiais em paralelo com as variações de entrada da máquina e variação do diâmetro do corpo de prova;
- análise comparativa entre os processos de têmpera por retificação e têmpera a laser quanto aos custos e variações entre processos;
- avaliar os resultados obtidos entre o processo de têmpera empregando CBN e Al_2O_3 ;
- Utilizar o mesmo processo e mesmo material empregando apenas rebolos de nitreto cúbico de boro (CBN);

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRÃO, A. M., Sistema para Avaliação de Desempenho Térmico de Pares Rebolo-Peça em Retificação. Dissertação de Mestrado. EESC – USP, 1991.

AGOSTINHO, 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.

ABNT. NBR. 8404/1980. Indicação do Estado de Superfícies em Desenho Técnico s/i. 1980.

ASTM, E384-99, Standard Test Method For Microindentation Hardness of Materials. p 409-424.

BADGER, J. A., “Burn Awareness”. Erastell Kloster Ab, Sweden Volume 52/number12, December 2000.

BIANCHI, E. C., ROBERTO, A., P., PIUBELI, B.N. Utilização dos Fluídos de Corte nos Processos de Retificação. Art Líber Editora, SP. 2004.

BRINKSMEIR, E., BOHM, C., HEINZEL, C., “Estabilidade dos processos na têmpera por retificação”. Máquinas e Metais. Janeiro 2003. p 80-89.

CALLISTER, W. Jr. Ciência e Engenharia dos Materiais. Uma introdução. 5ª edição. Editora L.T.C. – 2002, RJ. p210-213.

CATÁLOGO WINTER: Ferramentas Diamantadas e de Bornitrid. Publicação Winter do Brasil. 2004. 59p..

CHIAVERINI, VICENTE. Aços e Ferros Fundidos. Associação Brasileira de Metais. 1981. 503 p. COSTA, C. V. Tecnologia Mecânica de Máquinas. Ed. COTEC. São Paulo. 1980. 195p.

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

FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Ed. Edgard Blucher Ltda. SP.1977, 755p.

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

JOHNSON, G. A. “Beneficial compressive residual stress from CBN grinding”. SME. Second International Grinding Conference, Philadelphia. Pennsylvania- 1988 - p.1 -12.

MALKIN, S., Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. Society of Manufacturing Engineers, Michigan. 1989. 275p.

MOTTA, M.F., MACHADO A. R. Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção. Máquinas e Metais, 1995 p.44 -56.

OLIVEIRA, J. F. G., Análise da Ação do Macroefeito de Dressagem de Rebolos no Desempenho do Processo de Retificação. Tese de Doutorado. EESC. USP. 1988.272p.

SILVA, E. R., “Análise da Influência dos tipos de Fluidos de Corte e Rebolo na Retificação do Aço SAE HVN3”. Dissertação de Mestrado, UNESP Bauru. 2000.

SOUZA, DIAS INGLES, S. D. "Estudo das Superfícies Técnicas". Ed. Nobel. SP, 1980, p 66 -73.

SHIMAMUNE, T., MOCHIDA, M., ONO, KOHJI,. Grinding at Low Wheel Speed (1st report). Bull. Japan Soc of Prec. Eng., Spt. 1990,Vol 24.

SHAW, M., Jr. Heat-Affected Zones in Grinding Steel. Annals of the CIRP, v43/1. 1994. p. 279 -282.

SOUZA, S. A. Ensaio Mecânicos dos Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos. Ed. Edgard Blucher, 1982, 286p.

TABORGA, A. R. M.,TABORGA,J. D. M., WEINGAERTNER, W. L. Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolo CBN. FEMEC - UFU. Uberlândia - M.G. maio de 2003.

VIEIRA, M., LIBARDI, R., CANCELIERI, H., LIMA, A. "Influência das Condições de Retificação Sobre a Formação da Camada Afetada Pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas". IV Congresso Ibero Americano de Engenharia Mecânica. Santiago. Chile. 1999. p.3 - 6

VIEIRA, M., LIBARDI, R., CANCLIERI. H., LIMA, A. "Análise da Camada Afetada Pelo Calor na Superfície de Peças Retificadas". IV Seminário de Desgaste, Associação Brasileira de Metalurgia - ABM, São Paulo, Julho, 1998.p.5 -7.

WESTKÂMPER & KLYK, M. Retificação de diâmetros internos a alta velocidade com rebolos CBN. Máquinas e Metais. Out. 1998. p.38-53.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BIANCHI, E. C., SILVA, E. J., VARGAS, L.V., MAGAGNIM, T. C., MONICI, R. D., VICARI, O. F., AGUIAR P. R., "The Grinding Wheel Performance in the Transverse Cylindrical Grinding of na Eutetic Alloy". Materials Research. July 2002.

BIANCHI, E. C., SILVA, JANONE, MONICI, R. D., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R., Análise do Comportamento da Microestrutura de Materiais Endurecidos e Retificados com Rebolos CBN.UEP. Departamento de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica. Bauru. São Paulo. October 2000.

BRINKSMEIR, E.; COMMETT, J.T.: KONG, W.; LASKOVAR, La, P.; PETERS, J., TOENSHOF, H. K. Annals of the CIRP, 31/2, 1982, p.49.

DEDINI, R., Otimização de Ciclo de retificação Cilíndrica de mergulho de Girabrequins na Produção. Dissertação de Mestrado, FEM/Unicamp. 2000.
Johnson, G., Ratterman, E, 1998, Enhanced Product Performance Through CBN Grinding, Journal of Gear manufacturing, v5, n.5.1998.

MALKIN, S., Burning limit of Surface and cylindrical grinding of stells. Annals of de CIRP, 1978. 27p.

NISHIYAMA, Z. Martesitic Transformation. Acad. Press, 1978.

OBIKAWA, T. HAGIWARA, S. "Study on Edge Fracture of Abrasive Grain during Grinding with Applying the Theory of Markov Process" (1st Report), Bull, Japan Soc. of Prec. Eng. Vol 22 nº 2 June 1988.

GOMES DE OLIVEIRA, J. Tópicos Avançados sobre o Processo de Retificação. São Carlos 2001. (Apostila 2).

OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUERIO, B. Estudo do efeito das condições de afiação do rebolo nas forças de corte de retificação. In: 1º Congresso Científico de Pós-Graduação, São Carlos, 1986.

OLIVEIRA, J. F. G.; “A Caracterização da topografia de rebolos como parâmetro para análise de desempenho na retificação”. In: 1º Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Usinagem por Abrasão – ATBA, São Paulo, 1988, 13p.

PETERS, J. Contribution of CIRP research to industrial problem in grinding. In: Annals of the CIRP, 33/2, 1984. p. 452-468.

SHIMAMUNE, T., MOCHIDA, M., ONO, k., “Grinding at Low Wheel Speed”, (2st report). Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol 25. Mar. 1991.

SHAW, M.; “Principles of abrasive processing”, Oxford University Press Inc., England, 1996, 574p.

SNOYS, R.; PETERS, J., “The significance of chip thickness in grinding”.. Annals of the CIRP, v23, n2, p.227-237.

WEBATER, J., TRICARD, M. “Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding”. Saint Gobain Abrasives, USA. Annals of the CIRP. Vol. 53/2/2004 21p.

WAKUD, M., NASAKI I. Detection of Malfunctions in Grinding Processes. Department of Mechanical Engineering, Keio University. Japan. 2003.p. 494-501.

ANEXOS

- Anexo I Designation: E 140 – 02- Standard Hardness Conversion Tables for Metals.
- Anexo II Tabela da Medida da Diagonal Vickers HV1.
- Anexo III Resultados de Ensaios de Micro Dureza Vickers Corpo de Prova Teste.
- Anexo IV Percentuais de Elementos de Liga Aço ABNT 4340 do Fornecedor do Material do Corpo de Prova.

ANEXO I

**Designation: E 140 – 02- Standard Hardness Conversion Tables for
Metals**



Designation: E 140 – 02

Standard Hardness Conversion Tables for Metals¹ Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness

This standard is issued under the fixed designation E 140; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 Conversion Table 1 presents data in the Rockwell C hardness range on the relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, Rockwell superficial hardness, Knoop hardness, and Scleroscope hardness of non-austenitic steels including carbon, alloy, and tool steels in the as-forged, annealed, normalized, and quenched and tempered conditions provided that they are homogeneous.

1.2 Conversion Table 2 presents data in the Rockwell B hardness range on the relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, Rockwell superficial hardness, Knoop hardness, and Scleroscope hardness of non-austenitic steels including carbon, alloy, and tool steels in the as-forged, annealed, normalized, and quenched and tempered conditions provided that they are homogeneous.

1.3 Conversion Table 3 presents data on the relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, Rockwell superficial hardness, and Knoop hardness of nickel and high-nickel alloys (nickel content over 50%). These hardness conversion relationships are intended to apply particularly to the following: nickel-aluminum-silicon specimens finished to commercial mill standards for hardness testing, covering the entire range of these alloys from their annealed to their heavily cold-worked or age-hardened conditions, including their intermediate conditions.

1.4 Conversion Table 4 presents data on the relationship

1.7 Conversion Table 7 presents data on the relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, Rockwell superficial hardness, and Knoop hardness of copper.

1.8 Conversion Table 8 presents data on the relationship among Brinell hardness, Rockwell hardness, and Vickers hardness of alloyed white iron.

1.9 Conversion Table 9 presents data on the relationship among Brinell hardness, Vickers hardness, Rockwell hardness, and Rockwell superficial hardness of wrought aluminum products.

1.10 Many of the conversion values presented herein were obtained from computer-generated curves of actual test data. Most Rockwell hardness numbers are presented to the nearest 0.1 or 0.5 hardness number to permit accurate reproduction of these curves. Since all converted hardness values must be considered approximate, however, all converted Rockwell hardness numbers shall be rounded to the nearest whole number in accordance with Practice E 29.

1.11 Appendix X1-Appendix X9 contain equations developed from the data in Tables 1-9, respectively, to convert from one hardness scale to another. Since all converted hardness values must be considered approximate, however, all converted hardness numbers shall be rounded in accordance with Practice E 29.

1.12 Conversion of hardness values should be used only when it is impossible to test the material under the conditions



E 140

TABLE 1 Approximate Hardness Conversion Numbers for Non-Austenitic Steels (Rockwell C Hardness Range)^{A, B}

Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)	Vickers Hardness Number (HV)	Brinell Hardness Number ^C		Knoop Hardness, Number 500-gf and Over (HK)	Rockwell Hardness Number		Rockwell Superficial Hardness Number			Scleroscope Hardness Number ^D	Rockwell C Hardness Number 150 kgf (HRC)
		10-mm Standard Ball, 3000-kgf (HBS)	10-mm Carbide Ball, 3000-kgf (HBW)		A Scale, 60-kgf (HRA)	D Scale, 100-kgf (HRD)	15-N Scale, 15-kgf (HR 15-N)	30-N Scale, 30-kgf (HR 30-N)	45-N Scale, 45-kgf (HR 45-N)		
68	940	...	...	920	85.6	76.9	93.2	84.4	75.4	97.3	68
67	900	...	...	895	85.0	76.1	92.9	83.6	74.2	95.0	67
66	865	...	...	870	84.5	75.4	92.5	82.8	73.3	92.7	66
65	832	...	(739)	846	83.9	74.5	92.2	81.9	72.0	90.6	65
64	800	...	(722)	822	83.4	73.8	91.8	81.1	71.0	88.5	64
63	772	...	(705)	799	82.8	73.0	91.4	80.1	69.9	86.5	63
62	746	...	(688)	776	82.3	72.2	91.1	79.3	68.8	84.5	62
61	720	...	(670)	754	81.8	71.5	90.7	78.4	67.7	82.6	61
60	697	...	(654)	732	81.2	70.7	90.2	77.5	66.6	80.8	60
59	674	...	634	710	80.7	69.9	89.8	76.6	65.5	79.0	59
58	653	...	615	690	80.1	69.2	89.3	75.7	64.3	77.3	58
57	633	...	595	670	79.6	68.5	88.9	74.8	63.2	75.6	57
56	613	...	577	650	79.0	67.7	88.3	73.9	62.0	74.0	56
55	596	...	560	630	78.5	66.9	87.9	73.0	60.9	72.4	55
54	577	...	543	612	78.0	66.1	87.4	72.0	59.8	70.9	54
53	560	...	525	594	77.4	65.4	86.9	71.2	58.6	69.4	53
52	544	(600)	512	576	76.8	64.6	86.4	70.2	57.4	67.9	52
51	528	(487)	496	558	76.3	63.8	85.9	69.4	56.1	66.5	51
50	513	(475)	481	542	75.9	63.1	85.5	68.5	55.0	65.1	50
49	498	(464)	469	526	75.2	62.1	85.0	67.6	53.8	63.7	49
48	484	451	455	510	74.7	61.4	84.5	66.7	52.5	62.4	48
47	471	442	443	495	74.1	60.8	83.9	65.8	51.4	61.1	47
46	458	432	432	480	73.6	60.0	83.5	64.8	50.3	59.8	46
45	446	421	421	466	73.1	59.2	83.0	64.0	49.0	58.5	45
44	434	409	409	452	72.5	58.5	82.5	63.1	47.8	57.3	44
43	423	400	400	438	72.0	57.7	82.0	62.2	46.7	56.1	43
42	412	390	390	426	71.5	56.9	81.5	61.3	45.5	54.9	42
41	402	381	381	414	70.9	56.2	80.9	60.4	44.3	53.7	41
40	392	371	371	402	70.4	55.4	80.4	59.5	43.1	52.6	40
39	382	362	362	391	69.9	54.6	79.9	58.6	41.9	51.5	39
38	372	353	353	380	69.4	53.8	79.4	57.7	40.8	50.4	38
37	363	344	344	370	68.9	53.1	78.8	56.8	39.6	49.3	37
36	354	336	336	360	68.4	52.3	78.3	55.9	38.4	48.2	36
35	345	327	327	351	67.9	51.6	77.7	55.0	37.2	47.1	35
34	336	319	319	342	67.4	50.8	77.2	54.2	36.1	46.1	34
33	327	311	311	334	66.8	50.0	76.6	53.3	34.9	45.1	33
32	318	301	301	326	66.3	49.2	76.1	52.1	33.7	44.1	32
31	310	294	294	318	65.8	48.4	75.6	51.3	32.5	43.1	31
30	302	286	286	311	65.3	47.7	75.0	50.4	31.3	42.2	30
29	294	279	279	304	64.8	47.0	74.5	49.5	30.1	41.3	29
28	286	271	271	297	64.3	46.1	73.9	48.6	28.9	40.4	28
27	279	264	264	290	63.8	45.2	73.3	47.7	27.8	39.5	27
26	272	256	256	284	63.3	44.6	72.8	46.8	26.7	38.7	26
25	266	253	253	278	62.8	43.8	72.2	45.9	25.5	37.8	25
24	260	247	247	272	62.4	43.1	71.6	45.0	24.3	37.0	24
23	254	243	243	266	62.0	42.1	71.0	44.0	23.1	36.3	23
22	248	237	237	261	61.5	41.6	70.5	43.2	22.0	35.5	22
21	243	231	231	256	61.0	40.9	69.9	42.3	20.7	34.8	21
20	238	226	226	251	60.5	40.1	69.4	41.5	19.6	34.2	20

^A In the table headings, force refers to total test forces.

^B Appendix X1 contains equations converting determined hardness scale numbers to Rockwell C hardness numbers for non-austenitic steels. Refer to 1.11 before using conversion equations.

^C The Brinell hardness numbers in parentheses are outside the range recommended for Brinell hardness testing in 8.1 of Test Method E 10.

^D These Scleroscope hardness conversions are based on Vickers—Scleroscope hardness relationships developed from Vickers hardness data provided by the National Bureau of Standards for 13 steel reference blocks, Scleroscope hardness values obtained on these blocks by the Shore Instrument and Mfg. Co., Inc., the Roll Manufacturers Institute, and members of this institute, and also on hardness conversions previously published by the American Society for Metals and the Roll Manufacturers Institute.

ANEXO II**Tabela da Medida da Diagonal Vickers HV1**

Vickers HV 1

F = 9,804 N \cong 1 kp

Diagonale mm	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	185	182	178	175	171	168	165	162	159	156
0,11	153	151	148	145	143	140	138	135	133	131
0,12	129	127	125	123	121	119	117	115	113	111
0,13	110	108	106	105	103	102	100	98,5	97,4	96,0
0,14	94,6	93,3	92,0	90,7	89,4	88,2	87,0	85,8	84,7	83,5
0,15	82,4	81,3	80,3	79,2	78,2	77,2	76,2	75,2	74,3	73,4
0,16	72,4	71,5	70,7	69,8	68,9	68,1	67,3	66,5	65,7	64,9
0,17	64,2	63,4	62,7	62,0	61,2	60,6	59,9	59,2	58,5	57,9
0,18	57,2	56,6	56,0	55,4	54,8	54,2	53,6	53,0	52,5	51,9
0,19	51,4	50,8	50,3	49,8	49,3	48,8	48,3	47,8	47,3	46,8
0,20	46,4	45,9	45,4	45,0	44,6	44,2	43,7	43,3	42,9	42,5
0,21	42,1	41,7	41,3	40,9	40,5	40,1	39,7	39,4	39,0	38,7
0,22	38,3	38,0	37,6	37,3	37,0	36,6	36,3	36,0	35,7	35,4
0,23	35,1	34,8	34,5	34,2	33,9	33,6	33,3	33,0	32,7	32,5
0,24	30,9	30,7	30,5	30,2	29,9	32,2	31,9	31,7	31,4	31,1
0,25	29,7	29,4	29,2	29,0	28,7	28,5	28,3	28,1	27,9	27,6
0,26	27,4	27,2	27,0	26,8	26,6	26,4	26,2	26,0	25,8	25,6
0,27	25,4	25,2	25,1	24,9	24,7	24,5	24,3	24,2	24,0	23,8
0,28	23,6	23,5	23,3	23,1	23,0	22,8	22,7	22,5	22,4	22,2
0,29	22,0	21,9	21,7	21,6	21,4	21,3	21,2	21,0	20,9	20,7
0,30	20,6	20,5	20,3	20,2	20,1	19,9	19,8	19,7	19,5	19,4
0,31	19,3	19,2	19,0	18,9	18,8	18,7	18,6	18,4	18,3	18,2
0,32	18,1	18,0	17,9	17,8	17,7	17,6	17,4	17,3	17,2	17,1
0,33	17,0	16,9	16,8	16,7	16,6	16,5	16,4	16,3	16,2	16,1
0,34	16,0	15,9	15,9	15,8	15,7	15,6	15,5	15,4	15,3	15,2
0,35	15,1	15,0	15,0	14,9	14,8	14,7	14,6	14,5	14,5	14,4
0,36	14,3	14,2	14,1	14,1	14,0	13,9	13,8	13,8	13,7	13,6
0,37	13,5	13,5	13,4	13,3	13,3	13,2	13,1	13,0	13,0	12,9
0,38	12,8	12,8	12,7	12,6	12,6	12,5	12,4	12,4	12,3	12,3
0,39	12,2	12,1	12,1	12,0	11,9	11,9	11,8	11,8	11,7	11,6
0,40	11,6	11,5	11,5	11,4	11,4	11,3	11,2	11,2	11,1	11,1
0,41	11,0	11,0	10,9	10,9	10,8	10,8	10,7	10,7	10,6	10,6
0,42	10,5	10,5	10,4	10,4	10,3	10,3	10,2	10,2	10,1	10,1
0,43	10,0	9,98	9,93	9,89	9,84	9,80	9,75	9,71	9,66	9,62
0,44	9,58	9,53	9,49	9,45	9,40	9,36	9,32	9,28	9,24	9,20
0,45	9,16	9,11	9,07	9,03						

ANEXO III

**Resultados de Ensaio de Micro Dureza Vickers
Corpo de Prova Teste**

ANEXO IV

**Percentuais de Elementos de liga Aço ABNT 4340
Do Fornecedor do Material do Corpo de prova**

AISI/Sae		Tipo	Designação	Composição Química
AÇOESPECIAL				
CODIGO	COR			
8620l		Aço para cementação	1.6523 (21NiCrMo22)	C ...0,20% Si ...0,25% Mn ..0,80% Cr ...0,50% Mo ..0,20% Ni....0,55%
8640		Aço para beneficiamento	1.6546 (40NiCrMo22)	C ...0,40% Si ...0,25% Mn ..0,85% Cr ...0,50% Mo ..0,20% Ni....0,50%
4140		Aço para beneficiamento	1.7225 (42CrMo4)	C ...0,40% Si ...0,25% Mn ..0,90% Cr ...0,95% Mo...0,20%
4340		Aço para beneficiamento	16565 (40CrNiMo6)	C ...0,40% Si ..0,25% Mn ..0,70% Cr ..0,80% Ni ..1,80% Mo ..0,25%
1045		Aço carbono	1.0503/1.1191 (C45/Ck45)	C ...0,46% Mn ..0,75% P ..0,04% S ..0,05%
1020		Aço de Baixa Temperatura	1.0402 (C22)	C ...0,20% Mn ..0,30% P ..0,04% S ..0,05%

AÇOESPECIAL

Tel: (11) 3392-6700 - Fax: 3392-4042

www.acoespecial.com.brcontato@acoespecial.com.br