

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Efeitos da variação de parâmetros de corte na
microestrutura de um aço do tipo AISI 4340**

Leonardo Blunk Vasques da Silva

Professor Orientador: Matheus Campolina Mendes

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Efeitos da variação de parâmetros de corte na
microestrutura de um aço do tipo AISI 4340**

Leonardo Blunk Vasques da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior do
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Professor Orientador: Matheus Campolina Mendes

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

AGRADECIMENTOS

Ao professor Matheus Campolina Mendes, meu professor orientador. Obrigado por todo suporte, compreensão, apoio e paciência ao longo da execução do trabalho. Agradeço também a professora Tatiane de Campos Chuvás por todo incentivo, paciência, e auxílio a todo momento. Aproveito para agradecer a todos os colaboradores do CEFET/RJ que de alguma forma ajudaram na confecção e preparação das amostras.

Aos meus pais, Carmen Lúcia Blunk Vasques da Silva e Carlos Alberto Vasques da Silva, pelo carinho, amor, paciência, incentivo e suporte para que pudesse me dedicar e concluir o curso de graduação.

E a minha namorada, amigos e familiares que acompanharam minha trajetória ao longo do curso de graduação e da confecção deste trabalho, obrigado pela paciência, pelo apoio e pela compreensão.

RESUMO

A busca incessante pelo aumento da produtividade nas linhas de produção vem impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias que visam a melhoria nos processos produtivos. A retificação é um processo de usinagem por abrasão utilizado em sua maioria como etapa de acabamento por ter elevada precisão. A ferramenta de corte utilizada possui geometria de corte não definida, e isso acaba por dificultar o controle do processo. Associada a grande área de contato entre a ferramenta e a peça e por se tratar de um processo de alta velocidade, durante a retificação podem-se atingir elevadas temperaturas na superfície da peça. Apesar de gerar possíveis falhas, o controle dos parâmetros pode canalizar essa energia para a redução de etapas de fabricação por meio do aproveitamento da elevação da temperatura para gerar uma têmpera superficial. Este trabalho visa analisar como os parâmetros de corte influenciam nessa temperatura superficial e por consequência na alteração da sua microestrutura. Para isso foram utilizadas amostras de um aço AISI 4340 que foram submetidas à processos de retificação com diferentes condições. O efeito da temperatura atingida sobre a microestrutura foi avaliado através de caracterização microestrutural e ensaios mecânicos de microdureza. Os resultados mostraram que a variação da profundidade de corte pode gerar alteração microestrutural assim como endurecimento superficial.

Palavras chaves: retificação, têmpera, AISI4340, caracterização microestrutural

ABSTRACT

The endless search to increase the productivity is boosting the development of new technologies, which aim at improving processes. The grinding is a machining process that uses abrasives tools, mostly used as finishing process for having high precision. The tool used is a non-defined geometry, and it turn the process control harder. Associated with large contact area between the parts, and to be a high velocity process, during the grinding, high temperatures can be reached on the surfaces. Even if this high temperature can cause failures, the correct setup of the parameters can guide this energy to reduce steps on the process, using this to make a quenching. This work aims to analyze how the grinding parameters can change the temperature, and with this change the microstructure. For this, AISI 4340 samples were submitted to grinding process with different conditions. The effect of the reached temperature on the microstructure was analyzed by the microstructural characterization and microhardness mechanical tests. The results showed that variation of depth of cut could change the microstructure of the material and increase its hardness.

Keywords: grinding, quenching, AISI4340, microstructural characterization

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodologia e trabalho realizado	2
1.5 Organização do trabalho	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Aços	4
2.1.1 Tratamentos térmicos	7
2.1.2 Aço AISI 4340	14
2.2 Processo de usinagem por retificação	16
2.2.1 Parâmetros de corte	20
2.2.2 Rebolo	22
2.2.3 Integridade superficial na retificação	27
2.3 Têmpera por retificação	28
3. Materiais e métodos	31
4. Resultados e discussão	38
5. Conclusões	52
6. Sugestões para trabalhos futuros	53
7. Referências bibliográficas	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C [9].....	5
Figura 2.2 – Representação esquemática das fases [10].....	6
Figura 2.3 – Diagrama de resfriamento contínuo de um aço AISI 4340 [8].....	8
Figura 2.4 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de recozimento [10]	10
Figura 2.5 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de normalização [10].....	11
Figura 2.6 – Foto de um microscópio da estrutura martensítica [8].....	12
Figura 2.7 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera e revenido [10].....	13
Figura 2.8 – Faixa de endurecibilidade do aço SAE 1045H [10].....	14
Figura 2.9 – Faixa de endurecibilidade do aço SAE 4140 [10].....	14
Figura 2.10 – Evolução do processo de retificação (Adaptada de [1]).....	17
Figura 2.11 – Interação dos elementos durante o processo de retificação [1].....	17
Figura 2.12 – Tipos de retificação [3].....	18
Figura 2.13 – Tipos de retificação plana: (a) tangencial com movimento da mesa alternativo, (b) tangencial com movimento da mesa giratório, (c) plana com movimento da mesa alternativo e (d) plana com movimento da mesa giratório [17].....	19
Figura 2.14 – Máquina retificadora plana tangencial com mesa de movimento alternativo [17]	20
Figura 2.15 – Esquema da profundidade de corte no processo de retificação plana	21
Figura 2.16 – Estrutura do reboło [17].....	22
Figura 2.17 – Comparação entre tamanho de grãos [16]	23
Figura 2.18 – Velocidade de corte indicada para cada tipo de ligante [1].....	24
Figura 2.19 – Curva de desgaste em função do volume de material removido [17]	25
Figura 2.20 – Esquema de dressagem e parâmetros envolvidos no processo (Adaptada de [14])	26
Figura 3.1 – Esquema das amostras e da barra.....	31
Figura 3.3 – Cortadora metalográfica Arotec COR-80.....	32
Figura 3.4 – Forno mufla utilizado	33

Figura 3.5 – Diagrama esquemático do tratamento térmico realizado	33
Figura 3.6 – Retificadora plana tangencial Veker RVK-6030	34
Figura 3.7 – Esquema do corte da amostra em vista superior.....	35
Figura 3.8 – Amostra embutida, polida e atacada quimicamente.....	36
Figura 3.9 – Microscópio ótico utilizado	36
Figura 3.10 – Testador Knoop / Vickers utilizado	37
Figura 4.1 – Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura de partida, ferrita nas regiões claras e perlita das regiões escuras, em (a) 200X e em (b) 500X..	39
Figura 4.2 – Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 1, onde mantiveram-se as regiões de ferrita (nas regiões claras) e perlita (nas regiões escuras), em (a) 200X e em (b) 500X.	40
Figura 4.3 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 2, onde mantiveram-se as regiões de ferrita e perlita novamente, em (a) 200X e em (b) 500X.....	41
Figura 4.4 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 3, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.....	43
Figura 4.5 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 4, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.....	45
Figura 4.6 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 5, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.....	47
Figura 4.7 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 6, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.....	49
Figura 4.8 – Gráfico de dureza superficial das amostras	50
Figura 4.9 – Gráfico do ensaio de microdureza.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Sistema SAE e AISI de classificação dos aços [7].....	7
Tabela 2.2 – Composição química do aço AISI 4340 em condições regulares de produção, com peso percentual dos elementos de liga [12].....	14
Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas típicas de um aço AISI 4340 (temperado em óleo na temperatura de 845°C) [6].....	15
Tabela 3.1 – Condições de corte das amostras.....	32

Capítulo 1

Introdução

O processo de retificação é um dos mais importantes na linha produtiva de uma peça e vem sendo utilizado há muito tempo [1]. Utilizado desde os primórdios, a usinagem por abrasão foi fundamental para evolução humana, sendo aplicada na afiação de ferramentas que eram utilizadas em caças [2]. Nos dias atuais, evoluções tecnológicas, impulsionadas pela busca do aumento das velocidades e redução dos custos de produção, vem tornando cada vez mais ágil a concepção de peças acabadas.

A importância da retificação dentro das indústrias se dá devido ao fato de representar um processo de finalização de peças, onde se torna possível atingir excelentes níveis de precisão geométrica e tolerância dimensional, além de baixos níveis de rugosidade. É um processo de usinagem por meio de abrasão. Grandes áreas de contato entre a peça e a ferramenta em conjunto com altas velocidades do processo podem acarretar em danos superficiais da peça [3]. Essas duas características podem afetar a integridade superficial da peça devido à elevação demasiada da temperatura em sua superfície, que pode também resultar na formação de microestruturas, caracterizando assim um tratamento térmico [4]. A correta seleção dos parâmetros de corte é essencial para minimizar esses efeitos e atingir-se a alteração microestrutural. Contudo essa seleção é dificultada por fatores como tipo da ferramenta de corte, que possui geometria não definida, e sua resposta aos parâmetros selecionados, assim como a interação com o material a ser usinado [5].

O estudo da influência das variáveis do processo de retificação na temperatura superficial da peça pode acarretar em seleções dos parâmetros mais adequadas a determinados casos, além de dar a possibilidade de utilizar toda essa energia envolvida no processo para retirar a etapa de tratamento térmico do processo de produção, uma vez que pode ser possível a têmpera superficial por retificação.

1.1 Motivação

A busca por processos enxutos e ágeis vêm motivando a busca por alternativas de produção que atendam a tais requisitos. Alteração dos parâmetros de corte, tornando-os mais agressivos, é um dos artifícios que vem sendo utilizado. Porém, elevações demasiadas da

temperatura podem causar danos à peça, e no caso da retificação alterar a microestrutura em sua superfície.

Ao entender melhor a relação entre os parâmetros de corte e a microestrutura superficial resultante da peça usinada, torna-se possível o desenvolvimento de modelos de usinagem de forma a maximizar os ganhos, onde se obtém alteração na microestrutura sem denegrir a peça, possibilitando assim a supressão de etapas do processo produtivo (posteriores tratamentos térmicos).

1.2 Justificativa

O ajuste dos parâmetros de corte, além de evitar possíveis danos à peça, podem auxiliar na produtividade, de forma a suprimir a necessidade de tratamentos térmicos após as etapas de usinagem, promovendo a eliminação de uma etapa no processo de produção.

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar a existência de uma relação entre os parâmetros de corte utilizados na retificação tangencial plana e seus efeitos na microestrutura superficial de um aço AISI 4340. O foco será dado na análise da formação de martensita na superfície usinada, assim como a profundidade de alcance de sua formação baseado nos valores de dureza, e relacionada aos parâmetros de corte.

1.4 Metodologia e trabalho realizado

O desenvolvimento deste trabalho foi baseado em pesquisa bibliográfica dos assuntos mais significativos, tendo como fonte, principalmente, livros, artigos nacionais e internacionais de congressos, revistas, tão bem como teses de graduação, mestrado e doutorado.

Após uma análise preliminar da literatura e de trabalhos acadêmicos com temas relacionados a este trabalho de alguma forma, planejou-se uma diretriz de condução da confecção das amostras e da posterior preparação das mesmas, embasados em resultados previamente obtidos, de acordo com consultas à literatura, e gradativamente realizadas análises, medições e as devidas execuções de acordo com a disponibilidade dos laboratórios e professores de alguma forma envolvidos.

1.5 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, sendo eles: Capítulo 1 – Introdução, onde o tema é revelado e os principais objetivos e diretrizes de condução do projeto são definidos; Capítulo 2 – Revisão bibliográfica; Capítulo 3 – Materiais e métodos; Capítulo 4 –

Resultados e discussões, dos experimentos realizados e sua relação com a literatura; e Capítulo 5 – Conclusões. Seguidos de sugestões para trabalhos futuros e uma parte destinada às referências bibliográficas utilizadas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Aços

A evolução da humanidade teve como forte aliada o aparecimento de materiais metálicos. A história e crescimento de ambos se confundem, se cruzando em momentos que seus desenvolvimentos se tornam dependentes um do outro [6]. Atualmente, aços são encontrados em uma série de projetos de engenharia [7]. Isso se dá em grande parte, devido a elevada versatilidade que esse material possui aliado ao grande número de variações de propriedades que ele pode apresentar [8].

Os aços podem ser definidos, basicamente, como ligas metálicas. Seus principais componentes são: ferro e carbono [9]. Nos aços, os percentuais de carbono variam de 0,008% a 2,11%, o componente predominante é o ferro e os mesmos ainda possuem elementos remanescentes das etapas de seu processo de fabricação. A diferença entre o ferro fundido e os aços é, principalmente o percentual de carbono existente, que nos ferros fundidos chega a ser de 6,7 [10].

A partir do diagrama de equilíbrio ferro – carbono, mostrado na figura 2.1, pode-se observar a variação de solubilidade do carbono no ferro alfa em relação a temperatura em que o material se encontra. Nota-se que a temperatura ambiente a solubilidade do carbono no ferro alfa é de cerca de 0,008% e pode ser considerada nula [10]. As condições descritas no diagrama representam um cenário de resfriamento lento, por isso ele é denominado de equilíbrio.

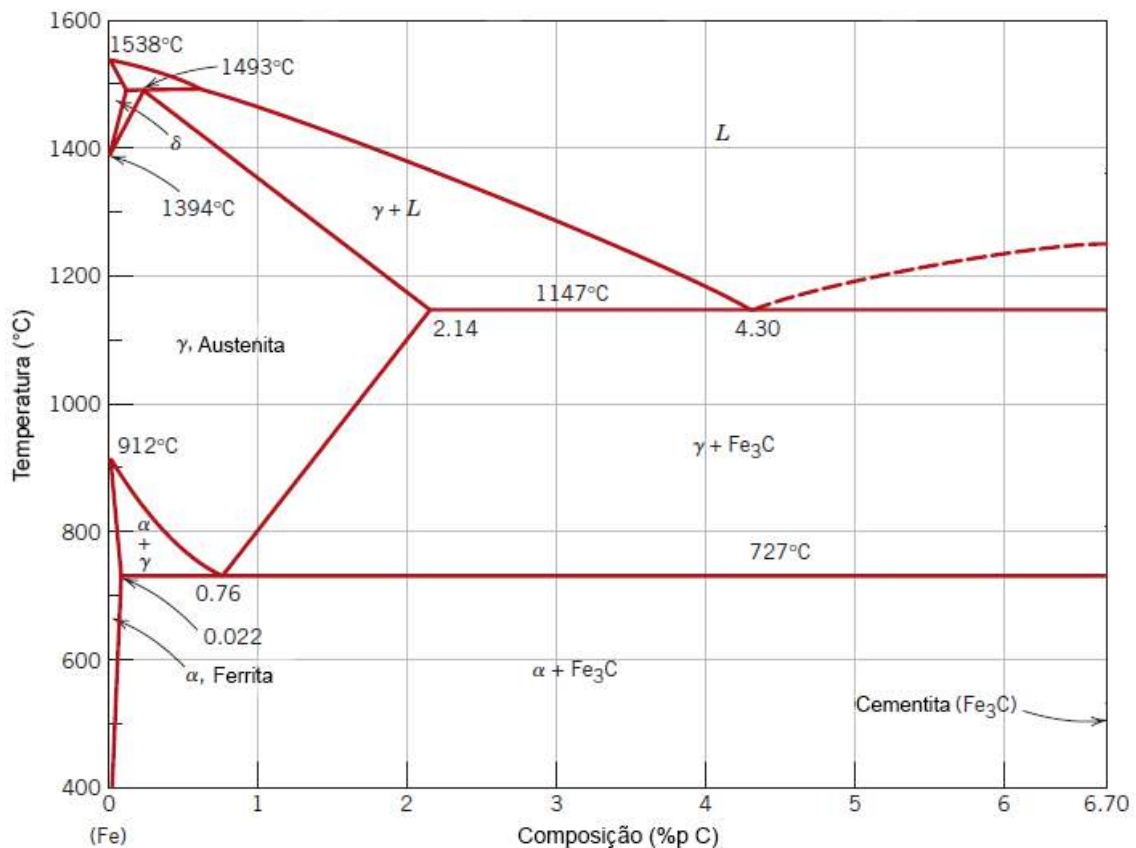


Figura 2.1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C [9]

De acordo com o percentual de carbono solúvel a 727°C , classificam-se os aços em três grandes grupos:

- Aço eutetóide – 0,76% de carbono em sua composição
- Aço hipoeutetóide – menos de 0,76% de carbono em sua composição
- Aço hipereutetóide – mais de 0,76% de carbono em sua composição

Acima de 727°C a fase predominante presente nos aços é a austenita, a qual é definida como sendo uma solução sólida de carbono no ferro gama. Abaixo dessa temperatura, começa a ocorrer a queda da solubilidade, e a austenita não se torna mais possível, pois não é mais estável.

Conforme o resfriamento e conseqüente solidificação do material, a solubilidade do carbono no ferro tende a cair até o ponto em que é considerada nula, como mencionado anteriormente. Dessa forma, começa a se observar o aparecimento de duas fases: uma matriz onde o elemento predominante é o ferro, denominada de ferrita, e uma região onde o carbono,

que já não é mais solúvel, se agrupa em forma lamelar, denominada cementita. No ponto eutetóide do diagrama é onde essas duas fases se encontram de forma equilibrada, que recebe o nome de perlita [10]. Baseado nisso, pode-se utilizar a classificação supracitada e relacioná-la com as fases, como é mostrado na figura 2.2:

- Aço eutetóide: somente existência de perlita (figura 2.2 c)
- Aço hipoeutetóide: matriz de ferrita com regiões de perlita (figura 2.2 b)
- Aço hipereutetóide: matriz de perlita com regiões de cementita (figura 2.2 d)

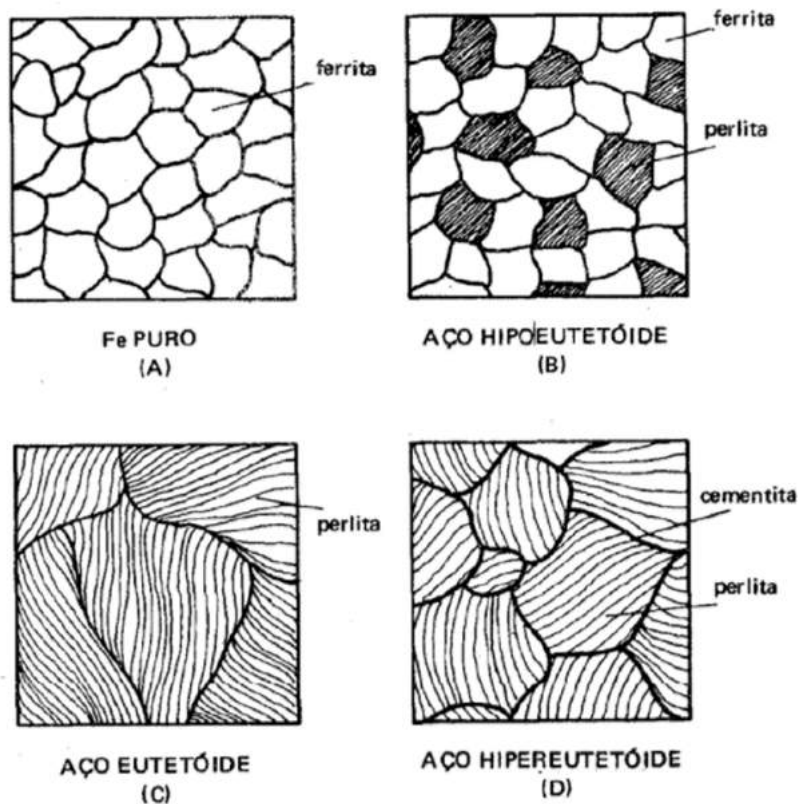


Figura 2.2 – Representação esquemática das fases [10]

A alteração dos elementos presentes nos aços, como percentual de carbono, pode alterar bruscamente as características e propriedades mecânicas do material. Com isso, a necessidade de controle das composições químicas e das propriedades se fez necessário e foram criadas normas para classificação dos aços. As mais utilizadas são a AISI – American Iron and Steel Institute e a SAE – Society of Automotive Engineers, e ambas classificam os aços utilizando números da seguinte forma: os dois primeiros números representam a quantidade de elementos de liga e os outros dois números representam a quantidade percentual de carbono [7]. Alguns exemplos podem ser observados na tabela 2.1:

Tabela 2.1: Sistema SAE e AISI de classificação dos aços [7]

Designação		Tipos de Aço
SAE	AISI	
10XX	C 10XX	Aços-carbono comuns
11XX	C 11XX	Aços de usinagem (ou corte) fácil, com alto S
13XX	13XX	Aços manganês com 1,75% de Mn
23XX	23XX	Aços-níquel com 3,5% de Ni
25XX	25XX	Aços-níquel com 5% de Ni
31XX	31XX	Aços-níquel-cromo com 1,25% de Ni e 0,65% de Cr
33XX	E 33XX	Aços-níquel-cromo com 3,5% de Ni e 1,57% de Cr
303XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Ni-Cr
40XX	40XX	Aços-molibidênio com 0,25% de Mo
41XX	41XX	Aços-cromo-molibidênio com 0,5% ou 0,95% de Cr e 0,12%, 0,2% ou 0,25% de Mo
43XX	43XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 1,82% de Ni, 0,5% ou 0,8% de Cr e 0,25% de Mo
46XX	46XX	Aços-níquel-molibidênio com 1,57% ou 1,82% de Ni e 0,2% ou 0,25% de Mo
47XX	47XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 1,05% de Ni, 0,45% de Cr e 0,20% de Mo
48XX	48XX	Aços-níquel-molibidênio com 3,5% de Ni e 0,25% de Mo
50XX	50XX	Aços-cromo com 0,27%, 0,4% ou 0,5% de Cr
51XX	51XX	Aços-cromo com 0,6 - 1,05% de Cr
501XX	-	Aços de baixo cromo para rolamentos, com 0,5% de Cr
511XX	E511XX	Aços de médio cromo para rolamentos, com 1,02% de Cr
521XX	E521XX	Aços de alto cromo para rolamentos, com 1,45% de Cr
514XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
515XX	-	Aços resistentes à corrosão e ao calor ao Cr
61XX	61XX	Aços-cromo-vanádio com 0,8% ou 0,95% de Cr e 0,1% ou 0,15% de V
86XX	86XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 0,55% de Ni, 0,5% ou 0,65% de Cr e 0,2% de Mo
87XX	87XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 0,55% de Ni, 0,5% de Cr e 0,25% de Mo
92XX	92XX	Aços-silício-manganês com 0,65%, 0,82%, 0,85% ou 0,87% de Mn, 1,40% ou 2,0% de Si e 0%, 0,17%, 0,32% ou 0,65% de Cr
93XX	93XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 3,25% de Ni, 1,2% de Cr e 0,12% de Mo
98XX	98XX	Aços-níquel-cromo-molibidênio com 1,0% de Ni, 0,8% de Cr e 0,25% de Mo
950	-	Aços de baixo teor de elementos de liga e alta resistência
XXBXX	XXBXX	Aços-boro com 0,0005% de B (mínimo)
XXLXX	CXXLXX	Aços-chumbo com 0,15 - 0,35% de Pb

2.1.1 Tratamentos térmicos

Em casos onde o resfriamento do aço não é lento, considera-se que ele ocorre fora do equilíbrio, e o diagrama apresentado na figura 2.1 não pode ser utilizado para prever as características do produto final [6].

Observando este fato, foram realizados experimentos com o intuito de conhecer e caracterizar o comportamento dos aços nessas condições diferentes. E oriundo disso,

originaram-se os diagramas de resfriamento contínuo, como pode ser visto abaixo na figura 2.2. Que servem principalmente para prever o comportamento do material em questão em diferentes taxas de resfriamento, possibilitando conhecer a microestrutura resultante.

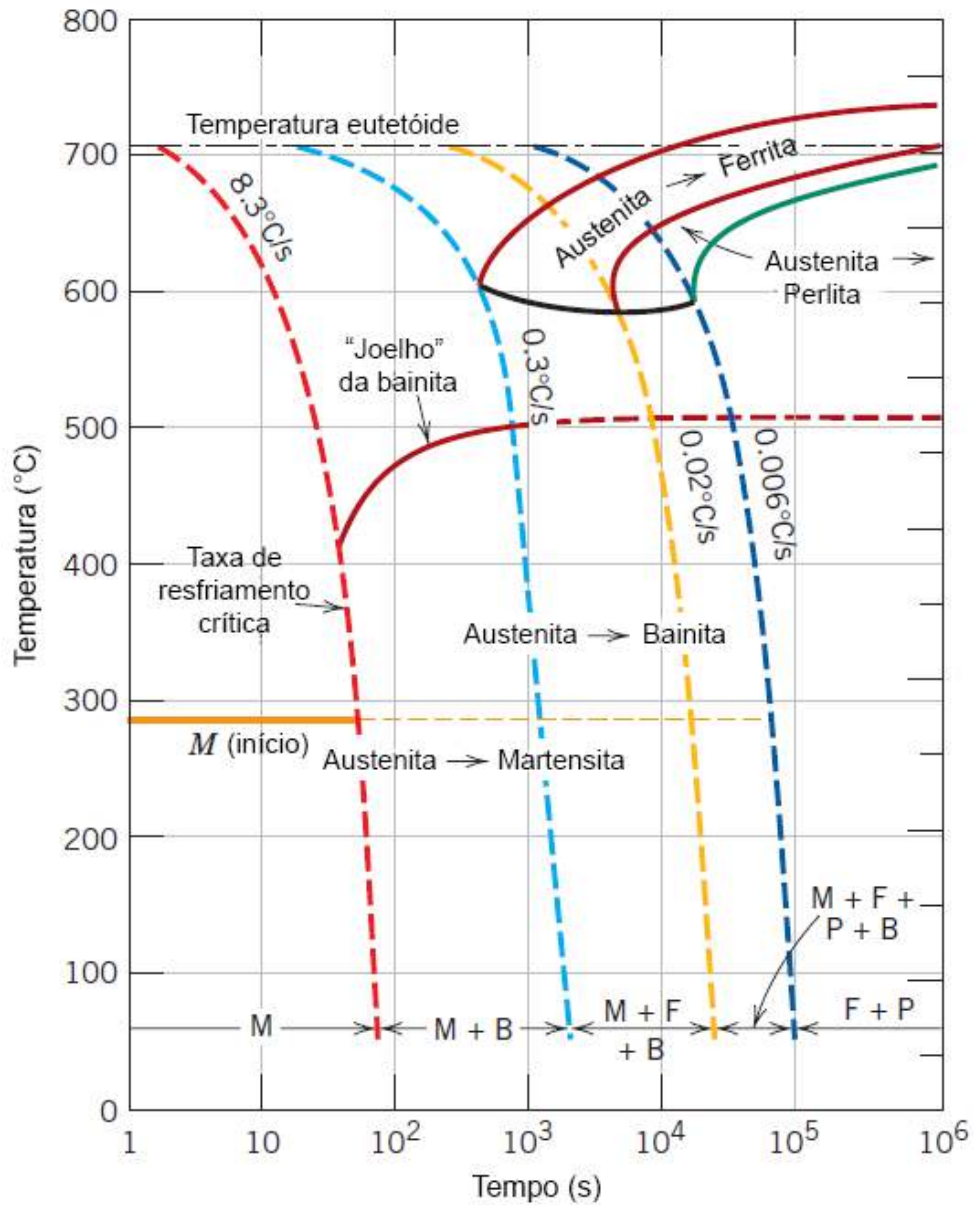


Figura 2.3 – Diagrama de resfriamento contínuo de um aço AISI 4340 (onde M = Martensita; B = Bainita; F = Ferrita; P = Perlita) [8]

Com a evolução dos estudos na área, passou-se a controlar e conhecer melhor o comportamento dos aços, além de entender quais fatores influenciam diretamente nos

tratamentos térmicos e portanto nas propriedades dos aços. Esses fatores são: velocidade de resfriamento e presença de elementos de liga [8].

Esse controle proporcionou a descoberta de diversas características nos aços, essas que estavam diretamente ligadas às microestruturas obtidas a partir do controle dos fatores citados anteriormente. Atrelado a isso, as propriedades, o que tornou e torna a gama de aplicação de aços cada vez maior, atendendo de forma excelente até mesmo casos com aplicações específicas [9]. A velocidade de resfriamento está diretamente ligada aos tratamentos térmicos e consequentemente às microestruturas resultantes de cada um deles.

Os tratamentos térmicos fazem uso de ciclos de aquecimento e resfriamento onde são controlados fatores como tempo de resfriamento, tempo de manutenção em determinada temperatura, atmosfera do forno, afim de se manipular a microestrutura resultante desse processo, e por consequência as propriedades do material [10]. Os principais tratamentos térmicos serão tratados a seguir.

2.1.1.1 Reozimento

O tratamento térmico de reozimento consiste na elevação da temperatura do material por um período de tempo longo e em seguida resfriado vagarosamente (ao forno) [8]. O principal objetivo do reozimento é fazer com que o material se recristalize, homogeneizando a estrutura do material e removendo evidências do processo produtivo ao qual foi submetido, como grãos alongados por exemplo. Outros objetivos que podem ser atingidos são: aliviar e/ou remover tensões existentes devido a pré-processamento do material; reduzir dureza e elevar tenacidade e ductilidade [10]. O atingimento de determinados objetivos está diretamente ligado e depende da taxa de resfriamento e da temperatura à qual o material foi elevado. Existem alguns tipos de reozimento, como supercrítico, intercrítico e subcrítico, que justamente diferem entre si devido ao fator de temperatura atingida. O esquema desse tratamento pode ser visto na figura 2.3:

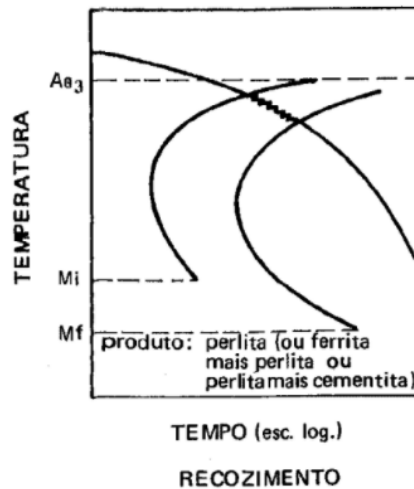


Figura 2.4 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de recozimento [10]

2.1.1.2 Normalização

O tratamento térmico de normalização se aproxima muito ao de recozimento. O tempo de elevação da temperatura e manutenção da mesma elevada é idêntico, porém, o resfriamento é feito de forma levemente mais rápida, utilizando-se resfriamento ao ar. Os objetivos, também semelhantes, são: homogeneizar a estrutura, melhorar algumas propriedades e refinar a estrutura. Esse refino torna-se possível ao se executar um resfriamento mais rápido, pois consegue-se uma microestrutura de granulação mais fina e por consequência melhores propriedades mecânicas [7]. Abaixo, na figura 2.4, pode-se analisar um esquema do tratamento em questão:

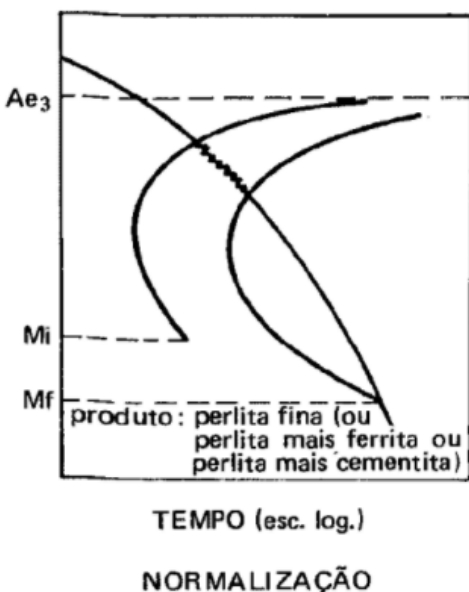


Figura 2.5 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de normalização [10]

2.1.1.3 Têmpera

O tratamento térmico de têmpera consiste no aquecimento da peça a uma temperatura superior a de austenitização do material, manutenção da mesma a essa temperatura dependendo do tamanho para homogeneizar a temperatura seguido de um resfriamento brusco e acelerado. O principal objetivo deste tratamento é transformar toda a austenita em martensita, e com isso elevar a dureza do material [8]. Este tratamento também gera a elevação das tensões residuais no material devido ao resfriamento acelerado que, devido a mudança de fase promove uma contração e expansão do material em função da fase formada ser levemente maior que a anterior.

A martensita é a fase obtida a partir da têmpera. Ela representa uma solução sólida supersaturada de carbono em ferro alfa. Por se tratar de um tratamento térmico de resfriamento acelerado, o carbono não possui tempo suficiente de completar sua difusão na matriz ferrítica e formar os compostos Fe_3C (cementita), formando assim as “agulhas” de martensita, que podem ser vistas na figura 2.6. Por se tratar de uma microestrutura que retém o carbono, percentuais mínimos do mesmo são fundamentais para sua formação. Tem como características principais a elevada dureza e resistência, semelhantes ao objetivo do tratamento que as forma. [7]



Figura 2.6 – Micrografia obtida por microscopia ótica apresentando uma estrutura martensítica [8]

2.1.1.4 Revenido

O tratamento térmico de revenido é feito após a têmpera e tem como objetivo principal atenuar as adversidades causadas pela têmpera. Devido a elevada taxa de resfriamento, o processo de têmpera gera uma elevada dureza junto com uma elevação considerável das tensões residuais, e o revenido é feito para aliviar essas tensões e conseqüentemente reduz a dureza do produto final, por elevar novamente a temperatura e permitir que as fases resultantes do tratamento térmico anterior sofram uma espécie de relaxamento.

Durante o revenimento não ocorre mudança de fase no material, pois seu objetivo é aliviar tensões. Ele é realizado após a têmpera, onde a peça a ser tratada é aquecida até temperaturas abaixo da zona crítica, para que não ocorra a dissolução do carbono retido previamente, o que descaracterizaria a têmpera. A temperatura do tratamento varia de acordo com a composição química do material [10]. Abaixo um esquema representando a têmpera seguida do revenido.

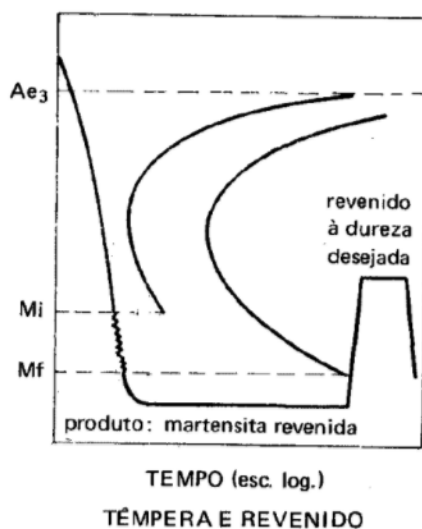


Figura 2.7 – Diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera e revenido [10]

Além da velocidade de resfriamento, os tratamentos térmicos são muito influenciados pelos elementos de liga presentes na composição dos aços. A importância dos mesmos se dá devido a uma propriedade fundamental para a formação de martensita: a temperabilidade.

Temperabilidade é capacidade que o material tem de formar martensita ao longo de toda a seção da peça [10]. A adição de elementos de liga melhora esta propriedade uma vez que desloca as curvas do diagrama de resfriamento contínuo para direita, favorecendo o surgimento de martensita. Portanto, quanto maior a temperabilidade, maior a profundidade endurecida atingida pela têmpera. Aços com diferentes composições químicas apresentam temperabilidades diferentes e conseqüentemente variação na profundidade endurecida, como pode ser visto nas figuras 2.8 e 2.9 abaixo:

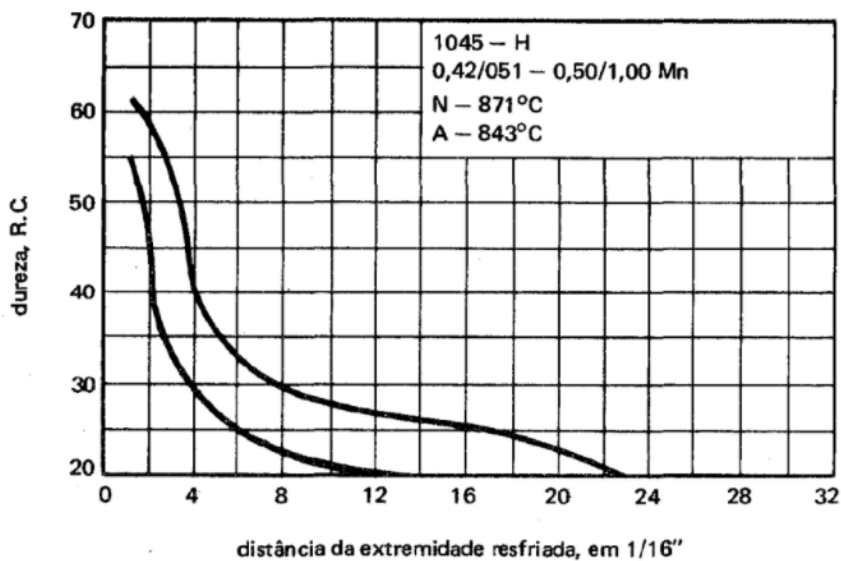


Figura 2.8 – Faixa de endurecibilidade do aço SAE 1045H [10]

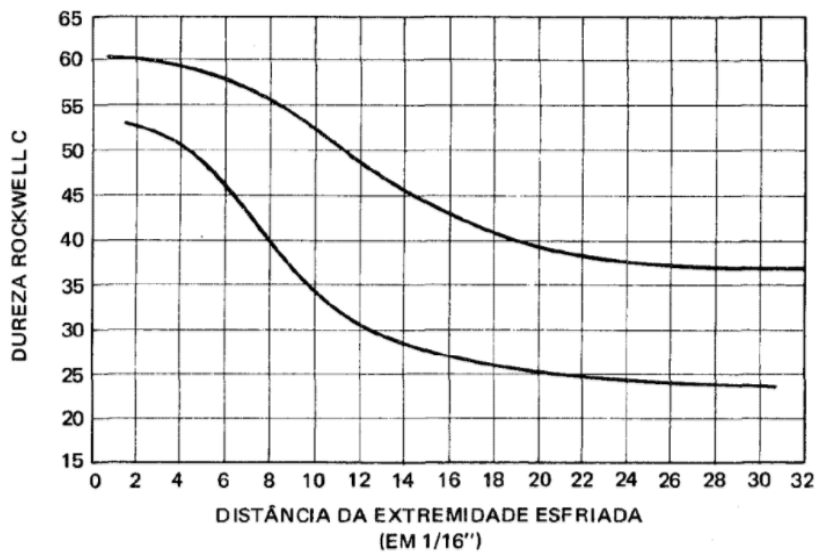


Figura 2.9 – Faixa de endurecibilidade do aço SAE 4140 [10]

2.1.2 Aço AISI 4340

O aço AISI 4340 é considerado um aço muito versátil, com excelentes propriedades e pode ser utilizado em solicitações simples até em condições severas. Essa gama de aplicação gera uma necessidade de diversas propriedades específicas para cada aplicação. Devido a isso, cada vez mais têm se buscado formas para atingir tais características [11].

Esse material pode ser encontrado nos mais variados formatos, desde barras até chapas. É encontrado como material constituinte de componentes de máquinas, como parafusos e engrenagens, eixos, mas também é usado na estrutura de determinadas aeronaves [12]. Além disso, pode ser encontrado em indústrias de energia nuclear [6].

2.1.2.1 Características

O aço AISI 4340 possui variadas características. As principais são: alta temperabilidade, o que lhe torna um ótimo material para ser tratado termicamente uma vez que confere uma boa penetração de dureza, e elevada resistência quando solicitado, que lhe confere uma boa capacidade de suportar esforços mecânicos. Além disso, o 4340 pode possuir boa tenacidade e resistência à fadiga, e chegar a valores de dureza que variam entre 54 e 59 HRC na condição temperada [9]. Ele pode chegar à resistência mecânica em torno de 1900 MPa, se temperado e revenido na temperatura em torno de 200°C [6]. Em condições regulares de produção, esse tipo de aço apresenta composição química dentro dos níveis mostrados na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Composição química do aço AISI 4340 em condições regulares de produção, com peso percentual dos elementos de liga [12]

AISI	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V
4340	0,38- 0,43	0,60- 0,80	0,035	0,040	0,15- 0,30	1,65- 2,00	0,70- 0,90	0,20- 0,30	...

As características e propriedades mecânicas deste aço podem variar conforme a composição sua química, devido à grande diversidade de combinações possíveis entre as quantidades dos elementos, e os tratamentos térmicos aos quais o mesmo foi submetido.

2.1.2.2 Tratamentos térmicos

O aço 4340 pode ser submetido a diversos tratamentos térmicos, como esferoidização, normalização, têmpera, entre outros, respondendo bem em diversos deles e obtendo características de acordo com a aplicação necessária.

A têmpera nesse material pode ser feita tanto em óleo, para seções menores, quanto em água, sendo utilizada para peças maiores. Na maioria dos casos, o revenido acompanha a têmpera afim de aliviar tensões residuais gerado na peça. A temperatura de revenido está ligada à dureza final da peça tratada termicamente, quanto maior a temperatura de revenido, menor será a dureza [12]. Estudos avaliaram a influência da temperatura do revenido na resistência

mecânica final da peça, da dureza e de outras propriedades, como pode ser observado na tabela 2.3, e conforme mencionado, a dureza, assim como a resistência, tende a se reduzir conforme o crescimento da temperatura de revenimento [6].

Tabela 2.3 – Propriedades mecânicas típicas de um aço AISI 4340 (temperado em óleo na temperatura de 845°C) [6]

Temperatura Revenimento (°C)	Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento em 50 mm (%)	Redução de Área (%)	Dureza HB	Dureza HRC
205	1980	1860	11	39	520	53
315	1760	1620	12	44	490	50
425	1500	1365	14	48	440	46
540	1240	1160	17	53	360	39
650	1020	860	20	60	290	31
705	860	740	23	63	250	24

2.2 Processo de usinagem por retificação

A retificação é um processo de grande importância entre as etapas de fabricação de componentes mecânicos (peças em geral) pois esta operação é realizada no acabamento final de peças mecânicas, o que influencia diretamente na aplicação desses componentes. Sua aplicação é cada vez maior no que diz respeito a complexidade de peças, sendo utilizada em peças comuns até em peças de máquinas de alto rendimento [1]. Datou-se os primeiros registros do processo em questão na época primitiva, com os seres humanos fazendo uso de pedras para afiar suas lanças e ferramentas [2]. Contudo, a tecnologia só foi agregada ao processo, de fato, no século XIX, por meio do desenvolvimento de retificadoras industriais e de abrasivos sintéticos [14]. As primeiras peças que utilizaram tal tecnologia para serem produzidas foram pequenos componentes de máquinas de costuras e, pouco tempo depois, peças de bicicletas [15]. Atualmente, estima-se que toda e qualquer peça utilizada foi fabricada por máquinas que possuem elementos retificados ou foi retificada diretamente [2].

A tecnologia aplicada à retificação evoluiu de forma rápida, sendo significativa entre os anos 80 e 90, como o desenvolvimento e aplicação de novas máquinas-ferramenta, utensílios e diferentes materiais para ferramenta de corte. Esse avanço possibilitou a utilização de maiores velocidades de corte, como pode observado na figura 2.10. Isso vem tornando o processo cada vez mais rápido, e conseqüentemente melhorando a produtividade na confecção das peças [1].

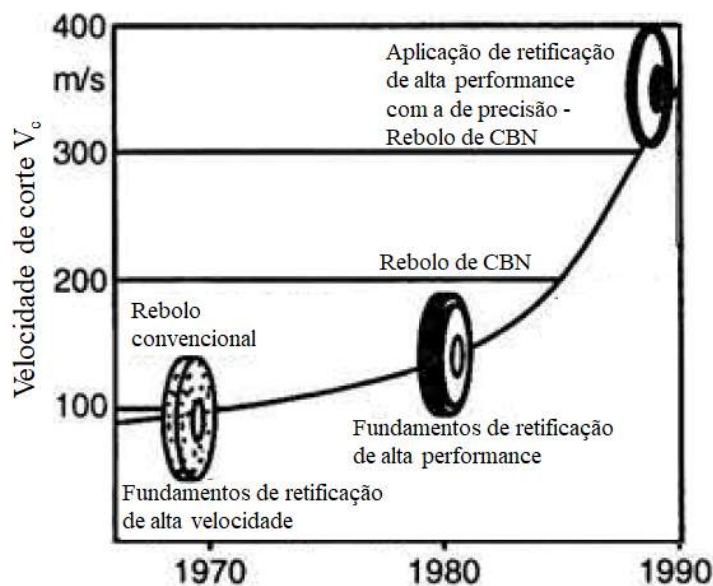


Figura 2.10 – Evolução do processo de retificação (Adaptada de [1])

O processo de retificação, diferentemente de outros tipos de operações, consiste na usinagem por meio de abrasão, onde a peça a ser usinada entra em contato com a ferramenta de corte, denominada de rebolo. Esta, por ter uma dureza superior, faz com que a mesma tenha material removido de sua superfície, formando assim o cavaco [16]. Na figura 2.11 pode-se observar um esquema da interação dos elementos básicos, como máquina-ferramenta, cavaco, fluido de corte, peça, rebolo, entre outros durante o processo.

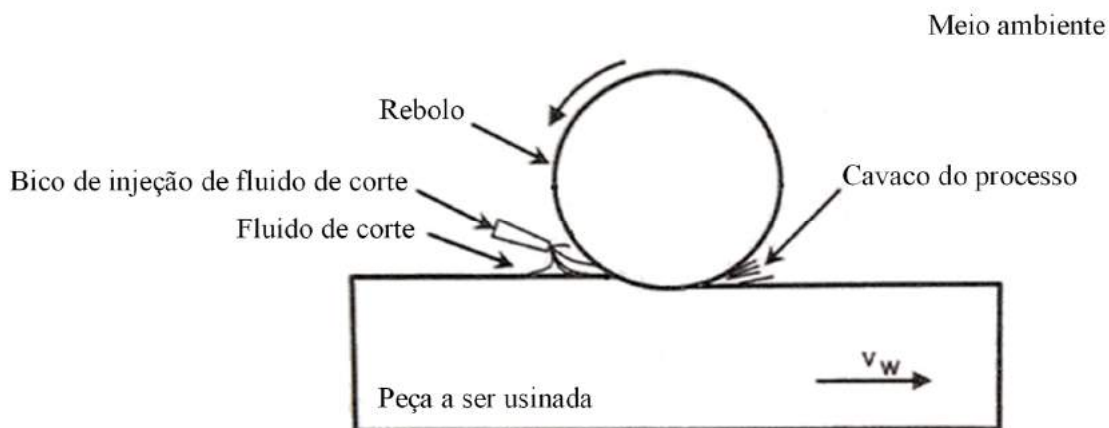


Figura 2.11 – Interação dos elementos durante o processo de retificação [13]

Considerando toda a rota de fabricação, a retificação é um dos últimos processos pelo qual a peça é submetida antes de finalizada, sendo configurada assim como um processo de acabamento. Isso é possível devido à alta precisão geométrica e tolerância dimensional que o

processo é capaz de entregar (tolerância dimensional por volta de IT4 e IT6 [3]), aliado ao bom acabamento superficial (rugosidade). Em geral, por ser uma etapa de finalização, o processo de retificação possui uma remoção de cavaco baixa, pois todo o material excedente da peça foi desbastado anteriormente. Esse é outro fator que contribui para que o processo tenha uma excelente precisão [2].

A operação de retificação, em geral, pode ser classificada de acordo com a superfície da peça que será usinada no processo. São divididas em três grandes grupos: cilíndrica, plana e de perfis, como pode ser observado na figura 2.12 [3].

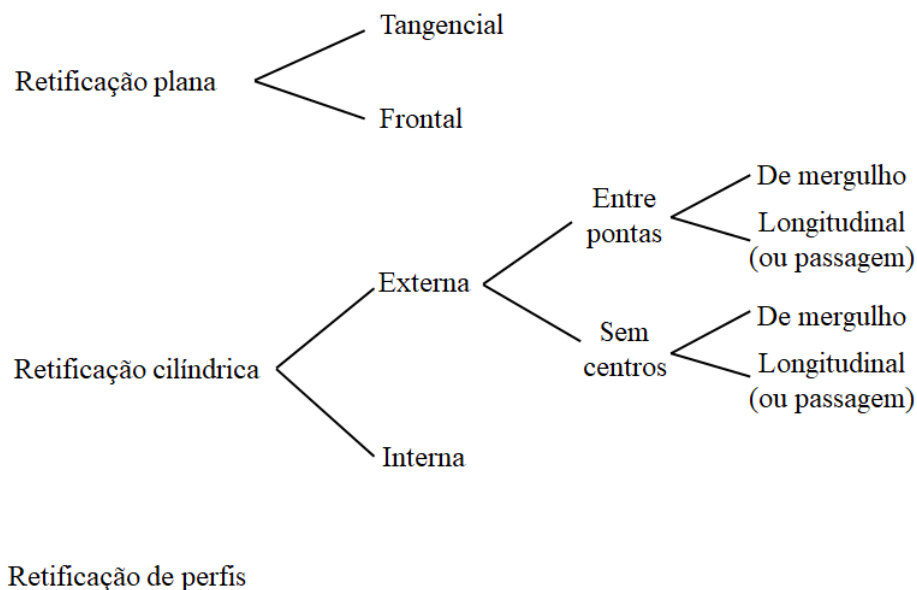


Figura 2.12 – Tipos de retificação [3]

A retificação cilíndrica consiste na execução do processo de usinagem em peças cilíndricas de fato. A retificação de perfis equivale ao processo em peças com perfis variados e específicos, configurando assim uma operação em que o rebolo tem formas diferenciadas. A retificação plana é responsável por executar a usinagem em superfícies planas.

A retificação plana, como no esquema da figura 2.12, pode ser dividida em tangencial e frontal. A diferença entre elas está na posição da peça em relação ao eixo do rebolo (ferramenta de corte). Na tangencial, o eixo de rotação do rebolo encontra-se na posição horizontal, paralelo à superfície retificada e a mesa pode ter tanto movimento alternativo como giratório. Na frontal,

o eixo fica na posição vertical, perpendicular à peça e a mesa pode apresentar os mesmos movimentos [17]. Na figura 2.13 estão representadas essas diferenças.

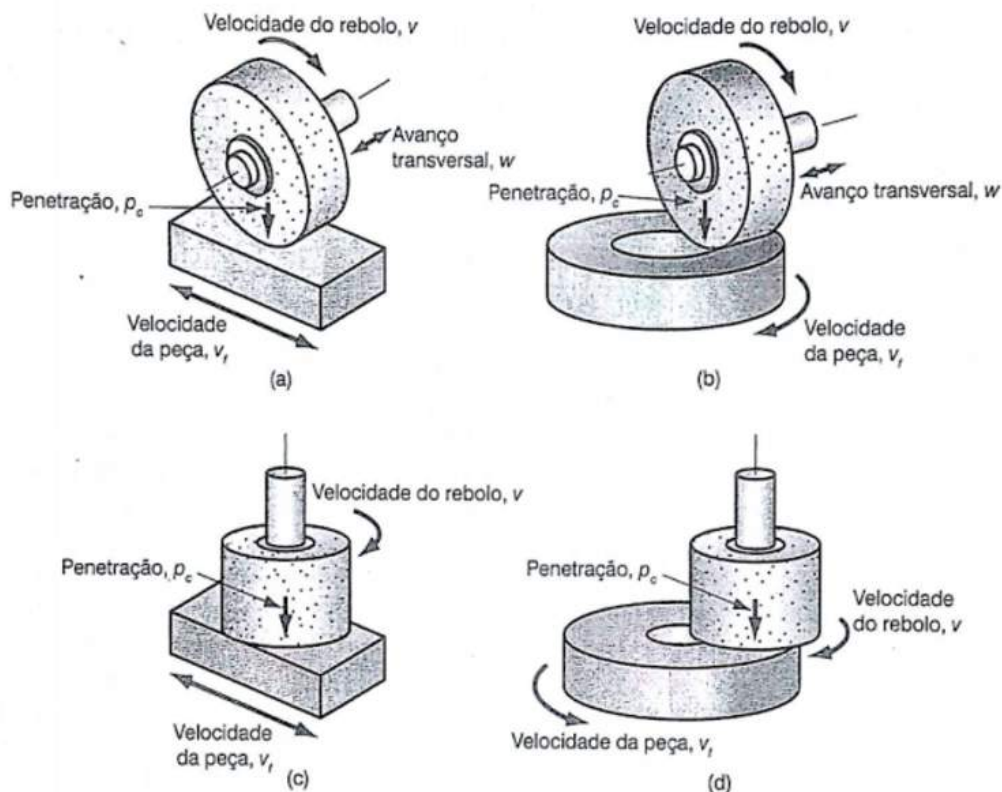


Figura 2.13 – Tipos de retificação plana: (a) tangencial com movimento da mesa alternativo, (b) tangencial com movimento da mesa giratório, (c) plana com movimento da mesa alternativo e (d) plana com movimento da mesa giratório [17]

Entre os tipos de retificação plana, a tangencial com movimento da mesa alternativo é o mais comum [17], sendo utilizada para usinagem de peças grandes [3] onde o rebolo varre toda a superfície a ser usinada combinando dois movimentos: o transversal, executado pelo próprio rebolo na direção do seu eixo, e o movimento da mesa. A máquina que realiza esse processo é mostrada na figura 2.14.

Uma característica desse processo é a elevada área de contato entre o rebolo e a peça. Devido à essa elevada área de contato e à pequena quantidade de material removido, durante o processo, tem-se elevadas taxas de energia envolvidas em relação à baixas quantidades de cavaco retirado [18]. Por esta razão, ocorre um aumento da temperatura na região onde está ocorrendo a usinagem. Com isso, podem ocorrer problemas como queima da superfície usinada, têmpera superficial na camada da peça seguido de possível novo endurecimento e fragilização,

geração de tensões residuais e possíveis trincas [19]. Esses impasses são difíceis de serem controlados, pois o processo de retificação possui uma gama grande de parâmetros de usinagem a serem selecionados, além da diversidade do material que constitui a ferramenta de corte que também influencia na superfície da peça. Ambos ainda apresentam variação nas respostas devido ao material que constitui a peça a ser usinada. Ou seja, esses fatores elevam a complexidade do processo [14].

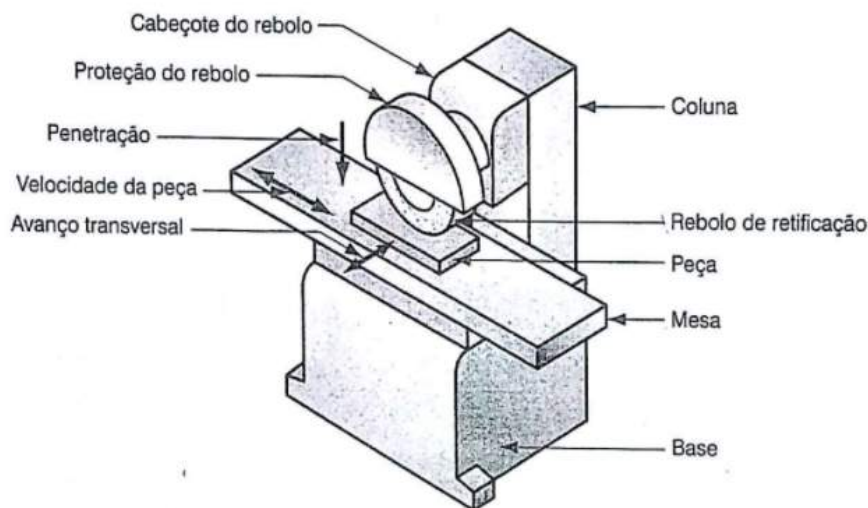


Figura 2.14 – Máquina retificadora plana tangencial com mesa de movimento alternativo [17].

2.2.1 Parâmetros de corte

No processo de retificação, indicado por altas velocidades e baixas taxas de remoção de material [18], estão envolvidos diversos parâmetros de corte. Os principais são: profundidade de corte, velocidade de corte e velocidade da peça. Usualmente, utiliza-se na retificação de um aço carbono de média dureza, com rebolo vitrificado e sob condições normais de corte profundidades de corte que variam entre 0,01 e 0,05 mm e velocidade de corte entre 30 e 35 m/s.

A profundidade de corte representa o quanto o rebolo irá retirar de material por passada. Ela é a diferença entre a altura inicial da peça e a final, como pode ser visto na figura 2.15. O aumento da profundidade de corte, por aumentar a área de contato entre a peça e o rebolo e conseqüentemente a taxa de remoção de material, pode acarretar em um aumento dos danos gerados durante o processo de retificação, visto que há aumento da temperatura na região usinada e das forças envolvidas durante o processo [14].

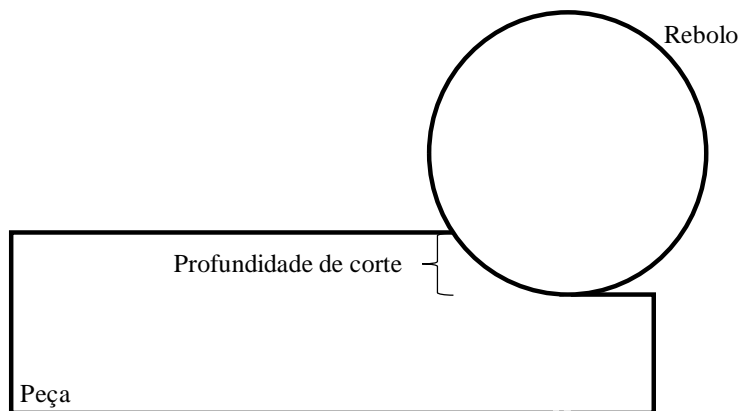


Figura 2.15 – Esquema da profundidade de corte no processo de retificação plana

A velocidade de corte, ou velocidade periférica do reboło (V_s) é representada pelo deslocamento de um ponto na superfície do reboło em um espaço de tempo. Ela é de extrema importância, uma vez que é responsável por estabelecer o tempo de vida útil do reboło, acarretando variação na eficiência do reboło em remover grãos abrasivos e no acabamento das peças. A unidade de medida normalmente utilizada é m/s, e pode ser definida pela Equação 2.1:

$$V_s = \frac{\pi \times d_s \times n_s}{60 \times 1000} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, como máquinas automatizadas e, principalmente associadas ao reboło, como novos materiais abrasivos e aglomerantes, essa velocidade de corte tem atingido valores cada vez mais altos [16]. E, com isso, apesar de agilizar o processo, altas velocidades de corte estão diretamente associadas a um aumento da temperatura superficial da peça, podendo assim gerar danos na mesma.

A velocidade da peça, no processo de retificação plana é a mesma que a velocidade da mesa, ou seja, é a velocidade de deslocamento linear do sistema. É normalmente utilizada em m/min, e é definida pela Equação 2.2:

$$V_w = \pi \times d_w \times n_w \quad (\text{Equação 2.2})$$

A variação deste parâmetro pode acarretar em danos na peça [16], pois o aumento demasiado dessa velocidade, somado à velocidade do rebolo, poderá gerar, também, uma elevação da temperatura superficial da peça, além da diminuição da vida útil do rebolo.

2.2.2 Rebolo

O rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação, atuando na retirada de material por meio da abrasão entre a superfície da peça e sua face externa. A sua estrutura é composta por grãos abrasivos, material aglomerante e vazios (ou poros). Os grãos são os responsáveis pela retirada de material da peça, já o aglomerante garante que as partículas fiquem unidas, definindo assim a estrutura do rebolo. Entre eles estão os poros, que são regiões vazias na estrutura do rebolo. Na figura 2.16 pode ser observada a estrutura de um rebolo [17].

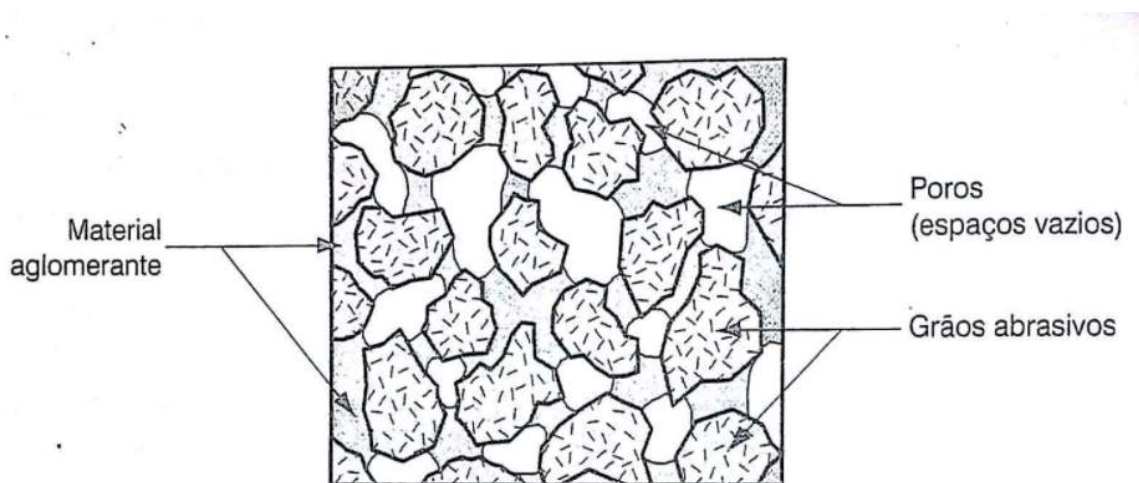


Figura 2.16 – Estrutura do rebolo [17]

As principais características, que definem o comportamento do rebolo durante o processo de retificação são: material abrasivo, tamanho de grão, dureza do rebolo, material aglomerante e estrutura. Essas características, quando associadas, possibilitam uma diversidade grande de rebolos. Essa variedade é importante, pois acarreta na existência de rebolos com características específicas e bem definidas, que atendem diferentes processos e materiais que as demandam [15].

Os principais materiais abrasivos utilizados na indústria atualmente são: Óxido de Alumínio (Al_2O_3), Carboneto de Silício (SiC), Nitreto Cúbico de Boro (CBN) e Diamante [3]. As características desses tipos de material são, em geral, elevada dureza, devendo ser

obrigatoriamente maior que a da peça a ser usinada [16], resistência ao desgaste e capacidade de auto afiação, ou seja, capacidade do grão se fragmentar ao se encontrar desgastado (friabilidade) [17]. Os rebolos superabrasivos (de CBN) foram desenvolvidos para suportar condições mais severas de processo, com isso, estão ganhando espaço no que diz respeito a utilização em escala industrial [14].

O tamanho dos grãos abrasivos determina a rugosidade da peça e a taxa de remoção de material [15]. Grãos pequenos irão entregar um melhor acabamento superficial, enquanto grãos maiores possibilitam uma maior taxa de remoção. A granulometria também é influenciada pela dureza da peça, quanto maior a dureza da peça menor o tamanho de grão e vice versa [15]. A classificação dos grãos, que segue a norma americana ANSI Standard B74. 12-1977 “*Specification for Size of Abrasive Grain*”, mostra que quanto maior o número, mais fino é o grão classificado. Essa norma indica a classificação de acordo com a peneira com a qual os grãos são separados, a unidade é mesh, e quanto maior o número do mesh, mais furos em uma mesma unidade de área, conseqüentemente, as aberturas para passagem de grão serão menores, e assim os grãos também serão, como pode ser visto na figura 2.17 [16]. Os rebolos de CBN e de diamante, não seguem a classificação dessa norma. Seus grãos são medidos em milímetros, e por isso, quanto menor seu número, menor será o tamanho do grão.

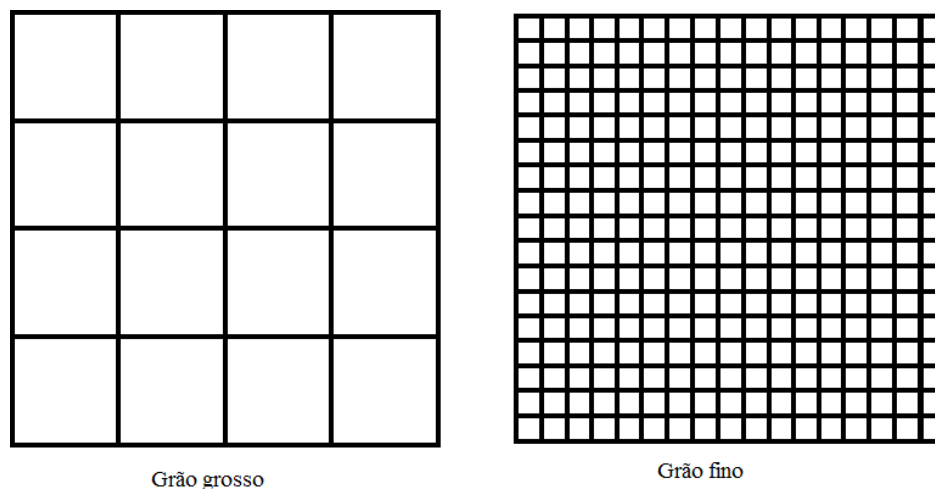


Figura 2.17 – Comparação entre tamanho de grãos [16]

A capacidade com que os grãos ficam retidos é a chamada dureza do rebolo [15]. A classificação deste tipo de característica vai de duro a macio, onde rebolos mais macios tem uma coesão mais baixa e os mais duros apresentam uma resistência maior no desprendimento

dos grãos [17]. Essa característica está diretamente relacionada ao material aglomerante, uma vez que é o responsável por manter o material abrasivo retido junto ao rebolo. É desejável a utilização de rebolos mais macios na usinagem de materiais mais duros, por desejar-se grãos se desprendam com uma taxa mais elevada, uma vez que os mesmos irão se desgastar mais rapidamente, necessitando assim serem renovados [15].

O material aglomerante é o elemento responsável por manter os grãos abrasivos unidos e fixados ao rebolo e deve suportar as condições severas durante o processo, como elevadas temperaturas e forças de usinagem. Dentre os principais tipos de ligante utilizados tem-se: vitrificado, silicato, metálico, oxi-cloridos, resinoide e borracha. Cada tipo de ligante tem uma aplicação e limites diferentes de parâmetros de corte. A figura 2.18 apresenta a relação entre tipo de ligante e a velocidade de corte que o mesmo suporta.

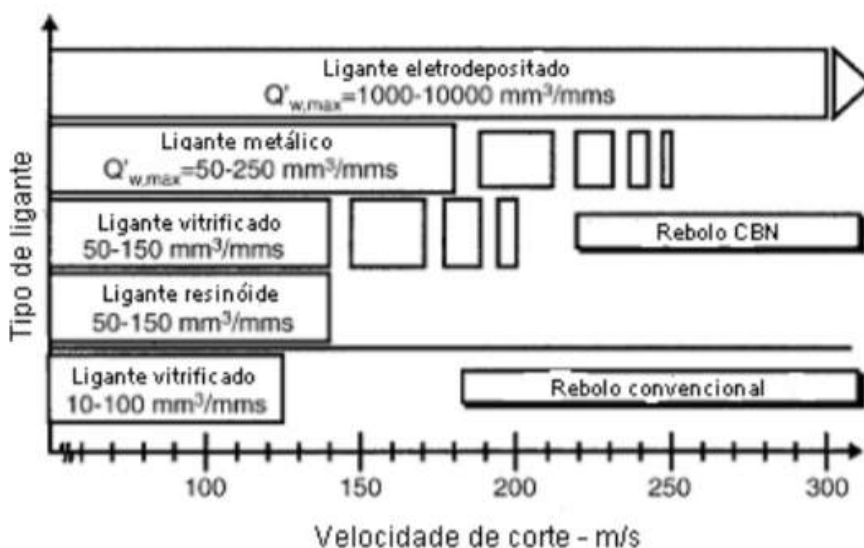


Figura 2.18 – Velocidade de corte indicada para cada tipo de ligante [1]

Devido a sua geometria, os grãos não se encaixam perfeitamente uns com os outros, e o ligante por sua vez não preenche todos os espaços entre eles. Com isso, o rebolo apresenta vazios entre os grãos. Isso se refere à estrutura do rebolo. Um rebolo pode apresentar três tipos de estrutura: aberta, média e fechada. O espaçamento entre os grãos que ditará a estrutura. Quanto mais próximos os grãos estiverem, menores serão os poros e consequentemente mais grãos por unidade de área se tem, tendo assim uma estrutura fechada. Quanto mais distantes eles estiverem, os poros serão maiores e existirá uma menor densidade de grãos, formando assim uma estrutura aberta [3].

A escolha da estrutura do rebolo é importante pois, a estrutura fechada pode causar queima superficial da peça, devido a presença de maior quantidade de elementos abrasivos atritando na peça. Além disso, a estrutura influencia no acabamento, onde uma estrutura muito aberta confere um acabamento com qualidade inferior [3]. Já a fechada dificulta o escoamento do cavaco, pois os vazios do rebolo são vias para retirada do cavaco, aumento as forças de corte. Os poros podem ficar entupidos e tornar a superfície do rebolo praticamente lisa, fenômeno chamado de espelhamento do rebolo.

Por ser formado de grãos aglomerados pelo ligante, o rebolo apresenta uma peculiaridade: sua geometria de corte não é exata e bem definida. Cada um de seus grãos tem uma orientação [3]. Esse fato faz com que o controle de todo o processo de retificação como a previsão de vida útil da ferramenta seja mais delicado, uma vez que a análise das forças envolvidas na usinagem não segue o mesmo padrão. Com a força variando, os danos gerados na peça também vão variar [1].

O desgaste do rebolo, diferente de outros processos de usinagem, é bem-vindo em determinados casos. Como visto anteriormente, há momentos em que o desprendimento dos grãos é bom para o prosseguimento do processo de usinagem, e nesses casos o desgaste é requerido com o intuito da renovação das arestas de corte atuantes, processo descrito como auto afiação do rebolo [15]. Porém, deve-se observar para que esse desgaste não seja excessivo, promovendo assim a retirada de grãos ainda afiados do rebolo [17]. A relação entre o desgaste do rebolo e o volume de material removido pode ser observada no gráfico mostrado na figura 2.19. O processo é mantido, em geral, na parte linear da curva. Essa região representa o patamar em que a ferramenta desgasta tanto quanto remove material, não acarretando em um desgaste excessivo do rebolo.

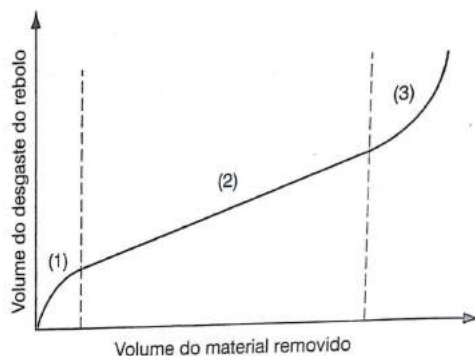


Figura 2.19 – Curva de desgaste em função do volume de material removido [17]

Denomina-se taxa G o fator que relaciona o volume de material removido com o desgaste da ferramenta. Quanto maior o volume de material removido com menor desgaste, maior a taxa G . Um valor baixo de G mostra um desgaste elevado da ferramenta, como mencionado anteriormente, apesar de manter os grãos afiados a todo momento. Um aumento excessivo de G pode resultar um rebolo sem capacidade de corte. Busca-se então a relação ótima em que os grãos se desgastem o suficiente para aumentar as forças de corte, causando assim o rompimento dos mesmos já em vias de ficarem sem capacidade de corte, renovando-se assim os grãos e a capacidade de corte do rebolo [15].

O rebolo, quando bem selecionado, renova seus grãos abrasivos ao longo do processo de retificação. Porém, em determinados casos, pode acontecer o entupimento dos vazios e o não desprendimento dos elementos abrasivos mais desgastados, prejudicando a usinagem.

O processo de dressagem consiste na afiação do rebolo e tem como objetivo reestabelecer a eficácia durante o corte, retirando grãos desgastados, e deixando grãos novos na superfície. Além disso, pode ser utilizado para corrigir problemas de concentricidade no rebolo [2]. A dressagem utiliza uma ferramenta denominada dressador (de alta dureza) para executar esse processo de renovação dos grãos. O mesmo se desloca lateralmente, percorrendo toda a espessura do rebolo, e todo seu perímetro, como mostrado esquematicamente na figura 2.20 [14].

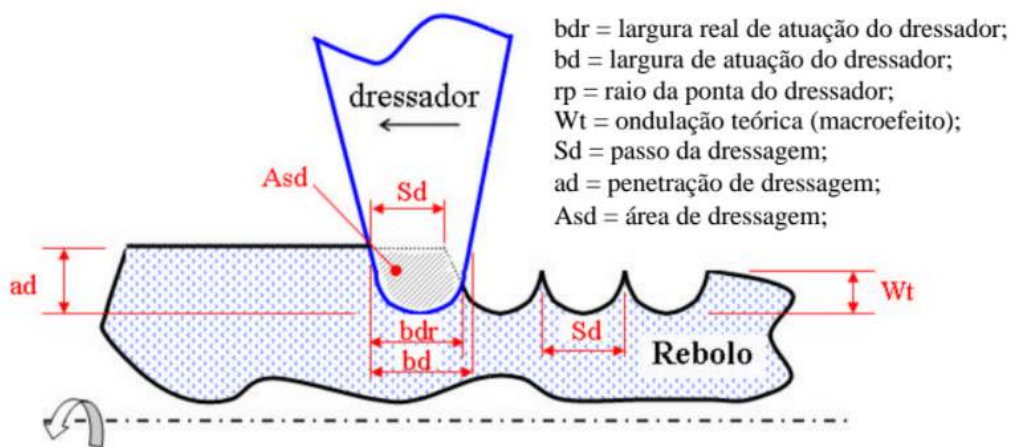


Figura 2.20 – Esquema de dressagem e parâmetros envolvidos no processo (Adaptada de [14])

2.2.3 Integridade superficial na retificação

O processo de retificação é um processo que envolve altas velocidades e por consequência altas temperaturas. Como em todos os processos de usinagem, existem danos causados durante o processo à peça. Devido às elevadas temperaturas, na retificação os principais danos são térmicos [4]. A escolha dos parâmetros de corte são parte fundamental para buscar a redução da incidência desses danos. Porém, o fato de os rebolos não possuírem uma aresta de corte bem definida e padrão aumenta a variabilidade do processo, contribuindo assim para um aumento da ocorrência de irregularidades [5].

O controle do processo também influencia, pois, uma vez selecionados os parâmetros, eles devem ser controlados ao longo do mesmo, com o intuito de mapear o comportamento do material. Caso esse controle seja falho, poderão aparecer danos no material usinado, por mais que os parâmetros tenham sido escolhidos da forma correta [14]. Possíveis danos oriundos da retificação são: expansão térmica, “queima superficial”, formação de camada branca, geração tensões residuais trativas e aparecimento de trincas [15].

A “queima superficial” é um dos mais comuns danos causados na peça e acontece no momento da usinagem. Ela ocorre pela elevação da temperatura no momento de contato entre o rebolo e a face da peça e é caracterizada pela formação de óxido na superfície. Essa “queima” afeta a microestrutura do material, podendo com isso gerar uma retêmpera e consequentemente levando a formação de martensita não revenida na peça. A dureza superficial nesse caso é elevada, porém essa camada costuma apresentar pouca profundidade [4]. Além disso pode ocorrer a formação de camada branca, que é constituída por uma martensita não revenida e não apresenta ganhos nas propriedades do material, além de em determinados casos prejudicá-lo, como no caso da resistência a fadiga, e também apresenta dureza superficial elevada, podendo causar um “falso endurecimento” devido a piora em diversas propriedades.

A variação de temperaturas ao longo do processo gera tensões residuais. Apesar de observadas tensões de compressão, os tipos de tensão que são considerados danos são as tensões de tração. Devido a diferença de temperatura e de tempo de resfriamento entre o interior da peça usinada e a camada superficial, as tensões residuais aparecem. Possíveis expansões térmicas também auxiliam para o aparecimento. Com elevada concentração de tensões, as trincas podem aparecer [15].

2.3 Têmpera por retificação

Diversos autores vêm estudando o processo de retificação e a energia e calor dissipados durante a usinagem [20-22]. A criação de novas máquinas tornou possível a evolução e criação de diversos processos de retificação. Esse maior conhecimento possibilitou a observação do comportamento dos materiais quando submetidos a retificações bruscas, onde pode-se observar alteração da microestrutura, e então buscou-se entender a fundo esse processo de transformação [20].

O processo de têmpera por retificação é uma tecnologia relativamente recente, a qual faz uso da grande energia envolvida no processo, conforme citado anteriormente por se tratar de um processo abrasivo onde as velocidades são elevadas e as áreas de contato também, induzindo-a a formar a microestrutura desejada. Esse processo propicia um tratamento térmico superficial [22].

Outros processos capazes de efetuar a têmpera superficial. Porém, um fator que torna o estudo dessa técnica vantajoso é que todos os demais processos inserem no fluxograma de produção da peça mais uma etapa, que além de custosa é complicada de ser incluída no processo produtivo; além da questão ambiental [20].

A tempera por retificação consiste em controlar e selecionar parâmetros de corte ideais, de forma a evitar a formação de defeitos que prejudiquem a integridade superficial da peça, conforme citado anteriormente, e maximizem a transferência de calor para a superfície usinada. A eficácia ou não do tratamento térmico por retificação está diretamente ligada aos parâmetros de corte [22]. O resultado é uma peça tratada superficialmente e com acabamento desejado. Para se atingir a tempera superficial é fundamental que a geração de calor seja em quantidade suficiente [21]. Porém, não somente a geração de calor é suficiente. Fatores como material utilizado também interferem no processo, pois a temperabilidade do mesmo é fator determinante para uma boa resposta ao tratamento. Com isso, essa técnica vem sendo utilizada com sucesso em alguns materiais, porém nem todos respondem de forma satisfatória já que não possuem temperabilidade suficiente para que se atinja o resultado desejado.

A tempera superficial é importante devido a capacidade que tem de atribuir a uma mesma peça duas propriedades completamente distintas, onde o núcleo possui uma característica, que geralmente é uma maior tenacidade e a superfície outra, que nesse caso é

mais dura e conseqüentemente resistente ao desgaste. Um exemplo de aplicação deste mecanismo são os eixos [20].

Alguns estudos [20-27] mostram que é possível a obtenção desta têmpera a partir da retificação. Eles relacionaram alguns parâmetros de corte e verificaram a possibilidade de obtenção de martensita por usinagem. Diferentes parâmetros foram variados. Os autores Zarudi & Zhang, 2002 [23] apresentam em seu trabalho essa variação de parâmetros, e obtendo bons resultados, conforme apresentado na figura 2.21. Pode-se observar a camada superficial e a profundidade atingida pelo processo de tratamento térmico por retificação, tão bem como a martensita formada.

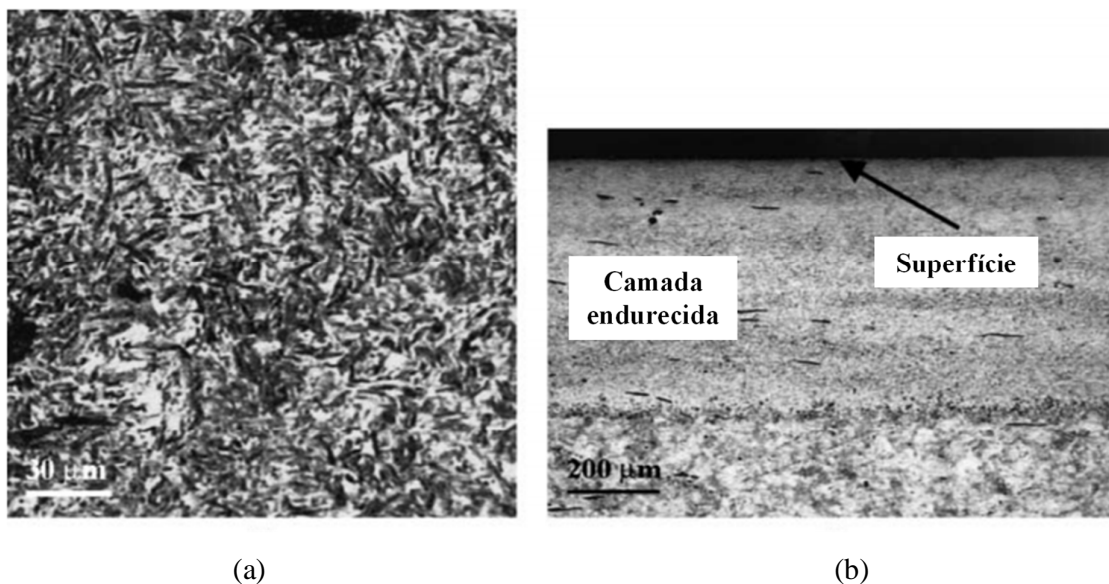


Figura 2.21 – Estrutura vista no microscópio ótico. (a) martensita; (b) superfície aquecida por retificação (profundidade de corte = 0,07 mm, velocidade da peça = 0,1 m/min) [23]

Com relação à dureza pode-se observar no trabalho do autor Judong L. *et al.*, 2012 [22] encontra um incremento da profundidade atingida com o aumento da profundidade de corte, como pode ser observado na figura 2.22. Espera-se essa relação pois com o incremento da profundidade torna-se o processo mais agressivo, gerando assim maior temperatura e podendo então chegar a uma maior profundidade.

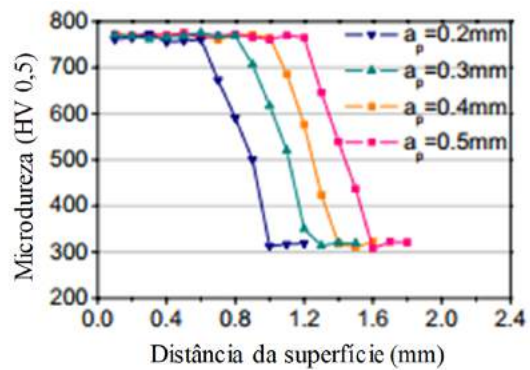


Figura 2.22 – Relação entre dureza e profundidade atingida, de acordo com a variação da profundidade de corte [22]

Capítulo 3

Materiais e métodos

3.1 Materiais

O material escolhido para ser utilizado no trabalho foi o aço AISI 4340 devido a sua alta temperabilidade. As amostras foram confeccionadas a partir de barras de aproximadamente 1 metro de comprimento e uma polegada de diâmetro, conforme figuras 3.1 e 3.2 mostradas abaixo. Foram feitas 6 amostras com 7 mm de altura.

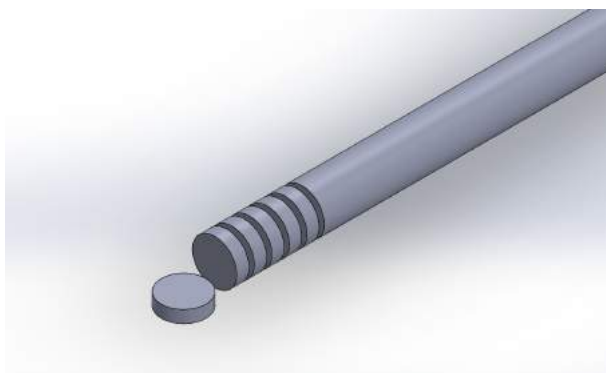


Figura 3.1 – Esquema das amostras e da barra

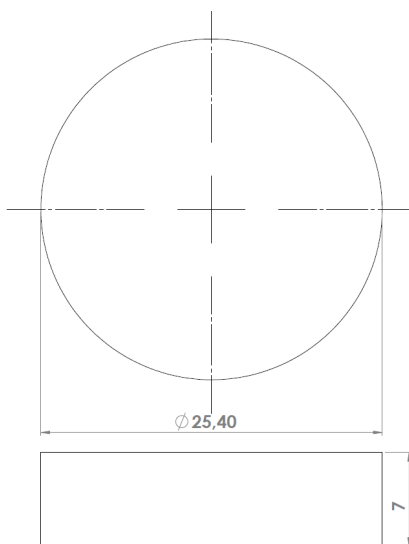


Figura 3.2 – Croqui da dimensão das amostras

As amostras foram cortadas no laboratório de materiais (LAMAT) no CEFET/RJ com a cortadora metalográfica Arotec COR-80, mostrada na figura 3.3, com lubrificação. Cada uma delas recebeu uma numeração de 1 a 6.



Figura 3.3 – Cortadora metalográfica Arotec COR-80

3.2 Tratamento térmico

Após o corte, as amostras foram submetidas ao tratamento térmico de recozimento, com o intuito de homogeneizar a microestrutura do material. Também foi executado no CEFET/RJ utilizando-se o forno mufla da marca Fornos Genga, conforme a figura 3.4. As amostras foram levadas ao forno em um recipiente onde se encontravam envoltas de carvão para evitar a descarbonetação.



Figura 3.4 – Forno mufla utilizado

O forno foi ligado e esperou-se até a temperatura estabilizar em 880°C, em seguida as amostras foram colocadas, tornou-se a aguardar a estabilização da temperatura e depois foram deixadas por 45 minutos na temperatura de 880°C. Após esse tempo o forno foi desligado e as amostras foram deixadas para resfriar lentamente dentro do mesmo, sendo retiradas apenas no dia seguinte. Na figura 3.5 está o gráfico de temperatura ao longo do tempo até o forno ser desligado.

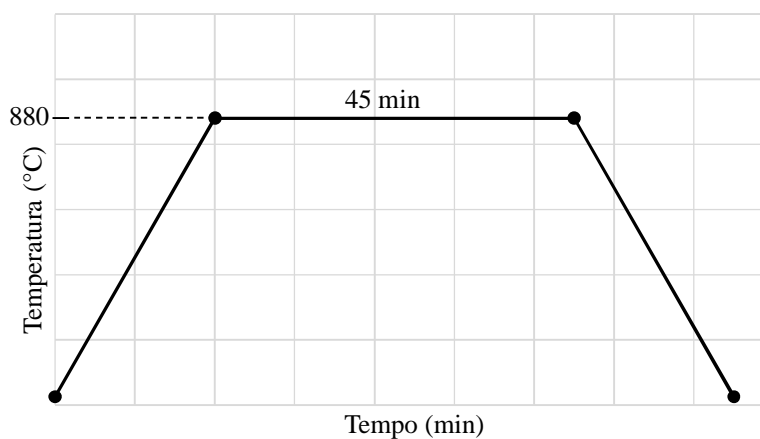


Figura 3.5 – Diagrama esquemático do tratamento térmico realizado

3.3 Retificação da amostra

A retificação das amostras foi feita no laboratório de retificação (LABRE) no CEFET/RJ. Utilizou-se a máquina retificadora plana tangencial Veker do modelo RVK-6030, como mostrado na figura 3.6. Em um primeiro momento, foram selecionadas algumas amostras para verificar qual parâmetro de corte que, quando variado, geraria maior efeito sobre a microestrutura. Estes testes não foram realizados para efeito de comparação direta, mas sim para determinar o melhor parâmetro a ser variado.



Figura 3.6 – Retificadora plana tangencial Veker RVK-6030

A literatura reporta que o aumento da temperatura gerado durante o processamento pode ser suficiente a ponto de promover transformações microestruturais nos materiais [20 – 27]. Neste contexto foram estudadas a variação de dois parâmetros de corte: profundidade de corte e a velocidade da peça (ou avanço da peça), além da utilização ou não do fluido de corte. Nas primeiras amostras variou-se tanto a profundidade de corte como a velocidade da peça e nas amostras seguintes a profundidade de corte foi sendo aumentada gradativamente e a velocidade da peça reduzida e mantida constante. A velocidade de corte (velocidade de rotação do rebolo) foi mantida constante em 31 m/s.

Tabela 3.1 – Condições de corte das amostras

Amostra	Velocidade da peça (m/min)	Profundidade de avanço (mm)	Fluido de corte
1	5,00	0,025	Sim
2	0,10	0,060	Sim
3	0,04	0,040	Não
4	0,04	0,060	Não
5	0,04	0,080	Não
6	0,04	0,100	Não

O rebolo utilizado no processo foi um rebolo de óxido de alumínio, cuja especificação é WA46I11V e corresponde às seguintes características: tamanho de grão médio, rebolo de dureza média para macia, estrutura levemente aberta e aglomerante vitrificado.

3.4 Preparação da amostra

As amostras foram cortadas transversalmente, como mostrado no esquema da figura 3.7 com o intuito de analisar o comportamento ao longo de toda a peça assim como a profundidade atingida pelo tratamento térmico por retificação. Para esse corte foi utilizada a mesma máquina de cortadora metalográfica.

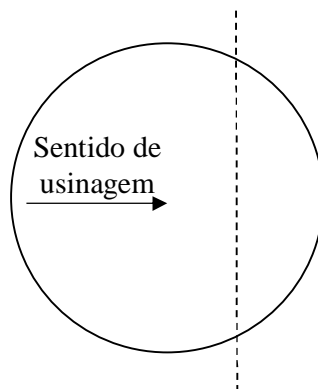


Figura 3.7 – Esquema do corte da amostra em vista superior

Em seguida, a meia lua cortada do disco foi embutida em baquelite, lixada, passando pelas lixas de 100, 200, 300, 400, 500, 600 e 1200 e em seguida polida até o pano de 1 micron. Após isso, duas amostras foram atacadas com Nital 2% e as demais com Lepera. Abaixo a foto de uma das amostras após o ataque.



Figura 3.8 – Amostra embutida, polida e atacada quimicamente

3.5 Análise metalográfica

Para a análise metalográfica foi utilizado o microscópio ótico (figura 3.9) do Laboratório de Materiais (LAMAT) do CEFET/RJ. O objetivo era avaliar a eficácia da variação dos parâmetros por meio da verificação da ocorrência de alguma alteração na microestrutura devido à elevação da temperatura superficial.



Figura 3.9 – Microscópio ótico utilizado

3.6 Ensaio de microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado também no LAMAT. Utilizou-se o testador de dureza (ou durômetro) knoop / vickers da Wilson Instruments, do modelo 422MVD, como apresentado na figura 3.10.



Figura 3.10 – Testador Knoop / Vickers utilizado

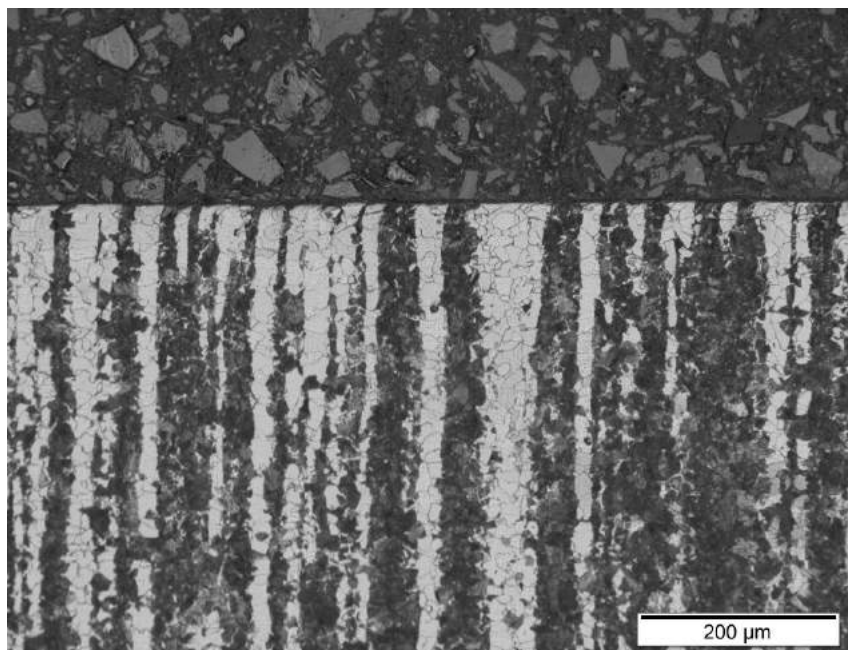
Para realização do perfil de microdureza foi utilizada a carga de 500g, indentador de diamante e tempo de 15 segundos. O espaçamento entre cada um dos pontos foi de 0,2 mm, para um total de 10 pontos de verificação da dureza, partindo da superfície usinada. O objetivo do ensaio foi para comprovação do endurecimento superficial devido a formação de martensita.

Capítulo 4

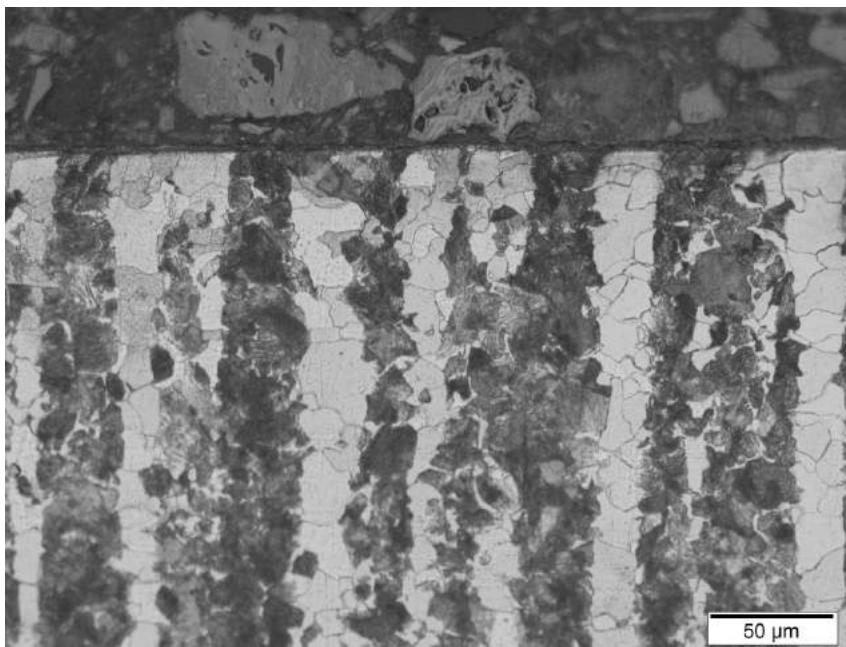
Resultados e discussão

4.1 Microestrutura de partida

A microestrutura de partida em todas as amostras consiste em uma matriz típica dos aços ao carbono que passaram por processos de conformação, apresentando bandas intercaladas de ferrita (região de coloração mais clara) e perlita (região de coloração mais escura), como mostrado na figura 4.1. A formação desse bandejamento é típico de aços ao carbono e ocorre durante a conformação mecânica a quente devido a segregação de elementos de ligas para certas regiões da microestrutura, tal fato altera localmente a tendência de formação da perlita ou da ferrita durante a o resfriamento. Neste contexto, essa microestrutura foi definida como padrão, e a partir de então qualquer microestrutura diferente seria formada pelo processo de usinagem.



(a)

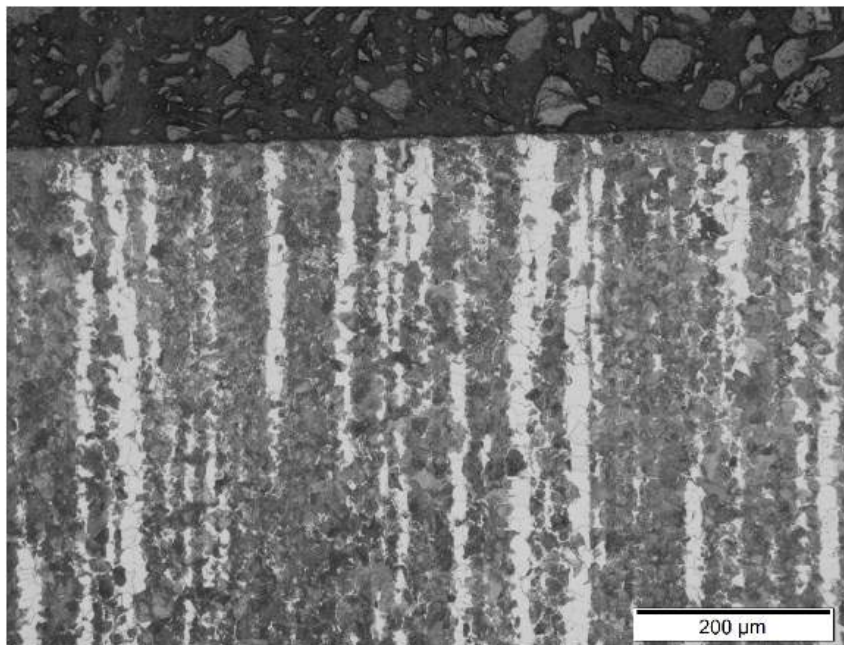


(b)

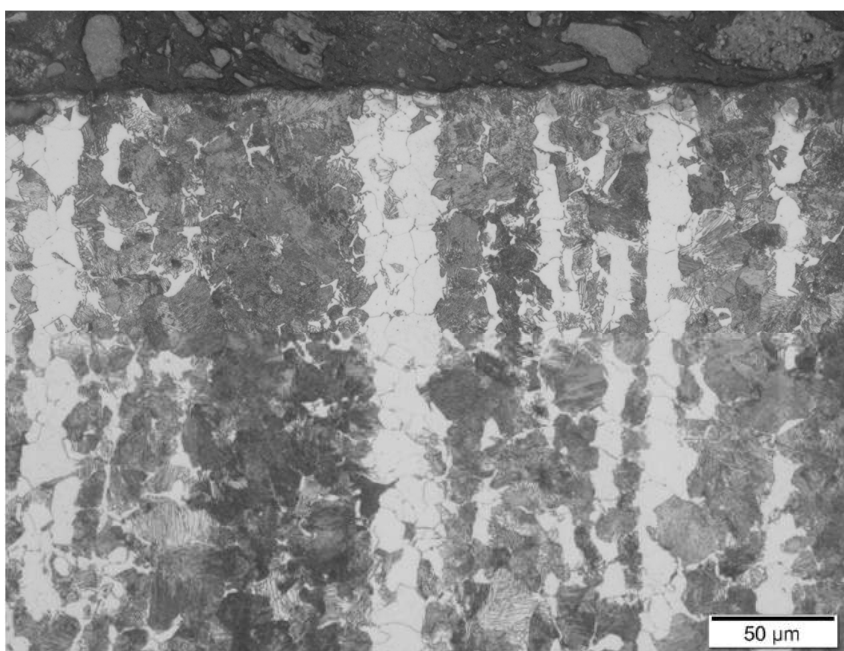
Figura 4.1 – Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura de partida, ferrita nas regiões claras e perlita das regiões escuras, em (a) 200X e em (b) 500X.

4.2 Efeito dos parâmetros de corte sobre a microestrutura

As análises microestruturais da amostra 1, usinada com a maior velocidade de avanço dentre todas (5,0m/min), com a menor profundidade de corte (0,025mm) e utilizando fluído de corte durante a usinagem, mostraram que a superfície superior usinada da peça não apresentou nenhuma alteração microestrutural em relação a peça como um todo, mantendo a estrutura de bandas intercaladas de ferrita e perlita, figura 4.2, assim como na microestrutura de partida.



(a)

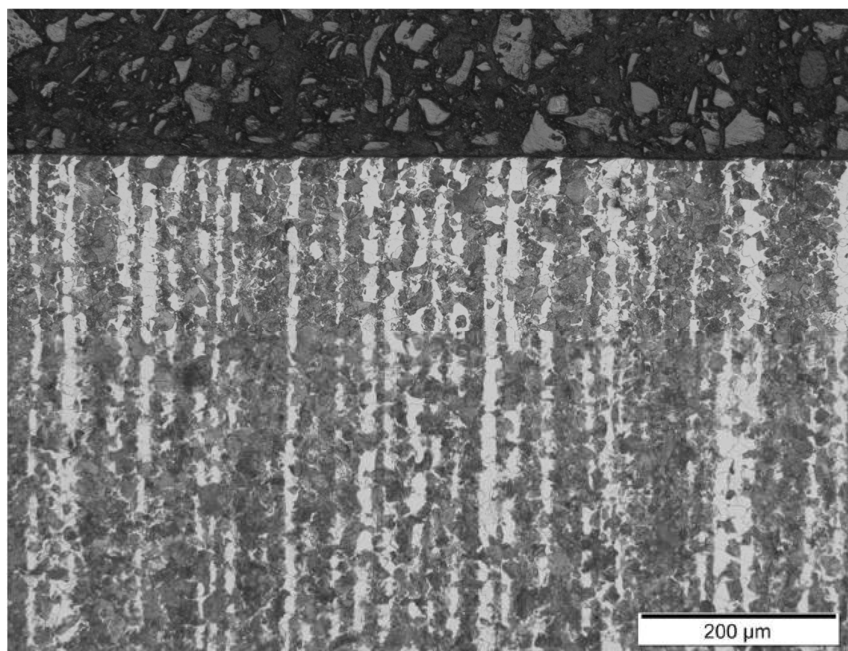


(b)

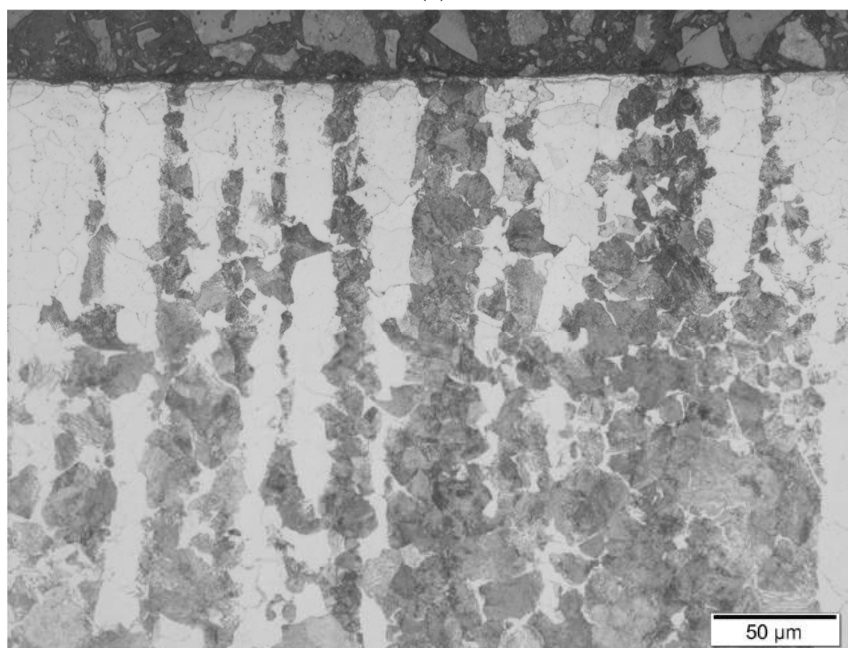
Figura 4.2 – Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 1, onde mantiveram-se as regiões de ferrita (nas regiões claras) e perlita (nas regiões escuras), em (a) 200X e em (b) 500X.

Na amostra 2, a velocidade da peça foi reduzida com o intuito de aumentar o tempo de contato entre a peça e o rebolo e foi selecionada uma maior profundidade afim de envolver mais energia no processo e, conseqüentemente, gerar um aumento da temperatura no local da

usinagem, uma vez que na primeira usinagem não foram observadas alterações. A utilização de fluido de corte foi mantida. A superfície usinada, novamente, não apresentou alteração em sua microestrutura, como observado na figura 4.3.



(a)

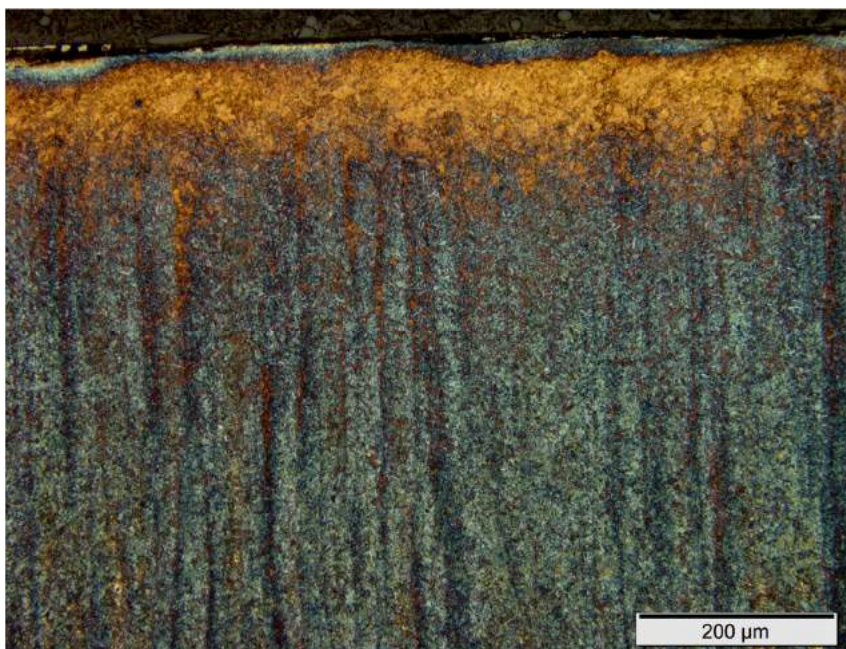


(b)

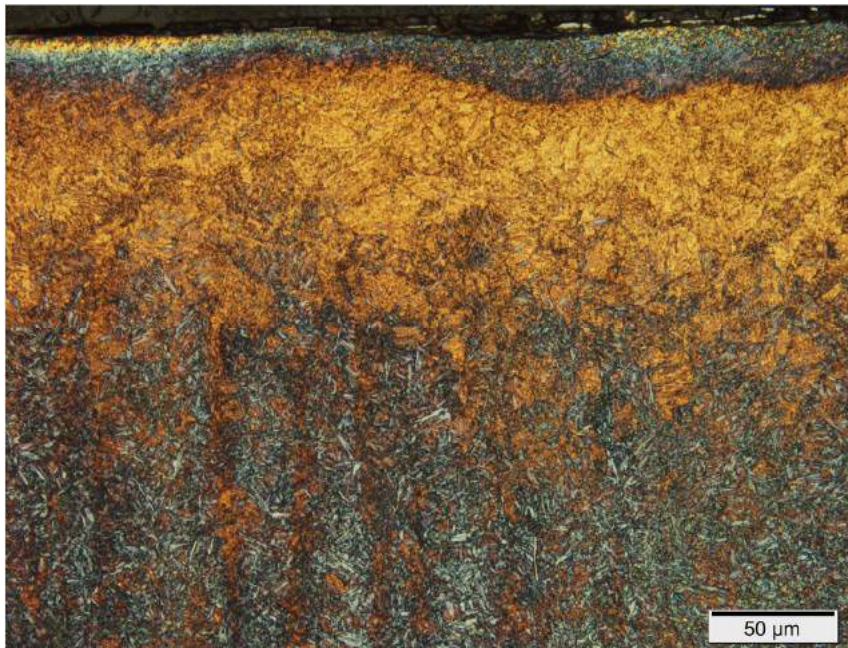
Figura 4.3 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 2, onde mantiveram-se as regiões de ferrita e perlita novamente, em (a) 200X e em (b) 500X.

Na usinagem da amostra 3, a velocidade da peça foi mais uma vez reduzida, com o mesmo objetivo, porém reduziu-se um pouco a profundidade de corte e não foi utilizado fluido de corte. Como mostrado na figura 4.4, a partir da utilização destes parâmetros, foi possível observar alteração microestrutural. As micrografias permitem observar a formação de uma camada predominantemente martensítica na superfície (de cor marrom) e em seguida uma região azulada, composta predominantemente por bainita, que também teve sua microestrutura modificada. Tal fato está relacionado com a alteração dos parâmetros de corte, principalmente da não utilização de fluido de corte, possibilitando assim que a superfície da peça atingisse temperatura suficiente para a ocorrência de transformações microestruturais.

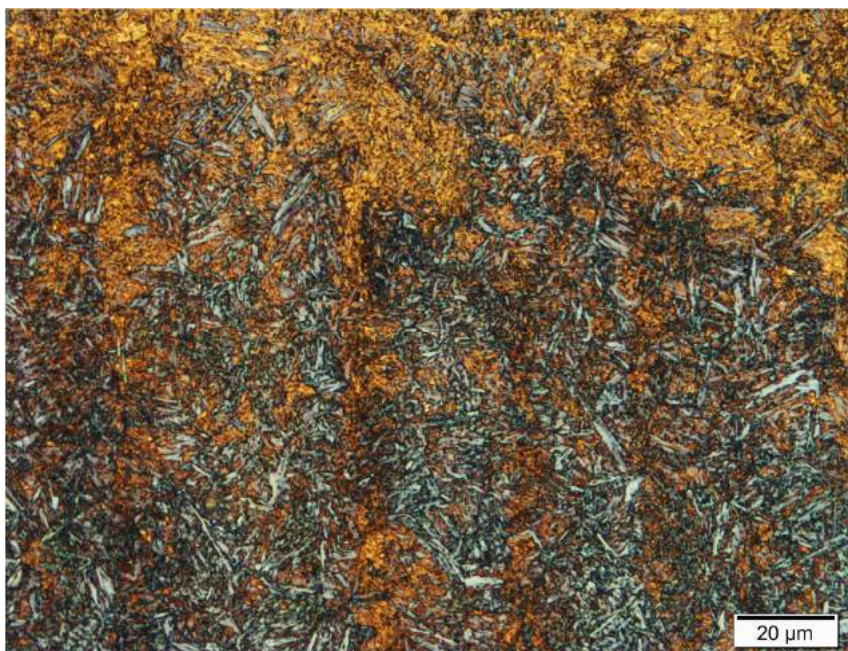
A profundidade da camada afetada pelo calor, composta pelas regiões martensítica, bainítica e misturada (composta por uma mistura de bainita, ferrita e perlita) não foi uniforme, variando consideravelmente ao longo do comprimento da amostra, atingindo uma profundidade máxima de 1 mm em algumas regiões, tal fato pode ser associado ao movimento de avanço da peça e às regiões de entrada e saída do rebolo. E próximo a superfície usinada pode-se observar uma formação diferente do restante, que é a chamada camada branca. Ela é prejudicial à peça. Para solucionar este inconveniente, basta executar um passe com profundidade de corte inferior a utilizada na preparação da amostra para retirada desta camada, pois ainda assim seria vantajoso em termos de produtividade.



(a)



(b)

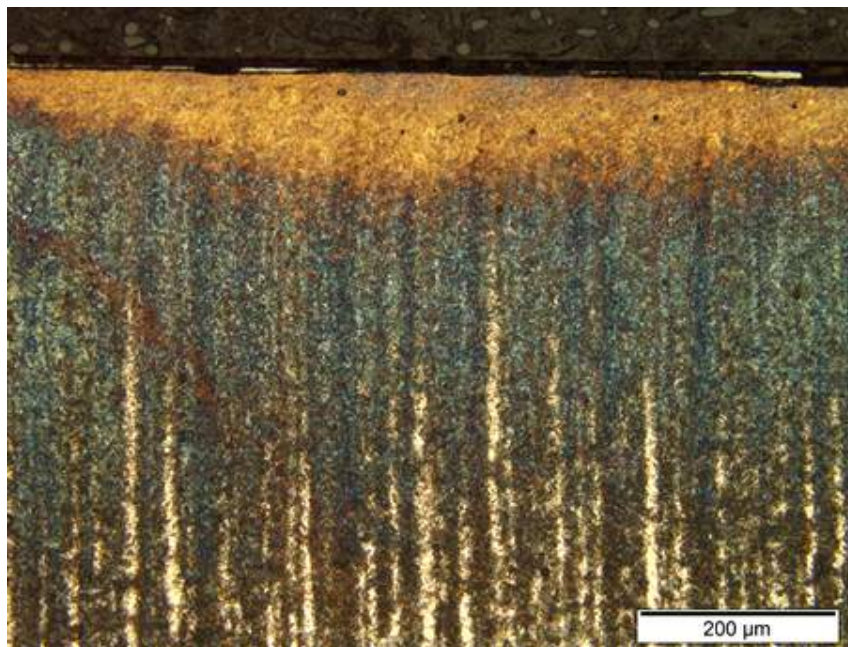


(c)

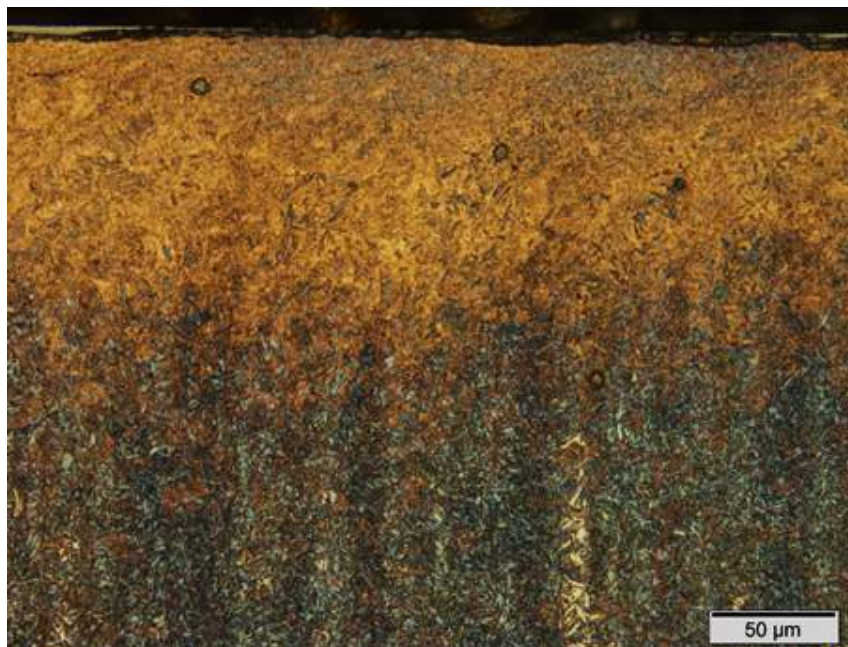
Figura 4.4 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 3, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.

Apesar da literatura [20, 24] relacionar o aumento da dureza de materiais retificados a formação de martensita, pôde-se observar que, além disso, é possível obter uma região bainítica após o processamento das mesmas, fruto do gradiente de temperatura obtido. Ao analisar as primeiras três amostras, foi possível observar que o melhor parâmetro a ser variado seria a profundidade de avanço devido a facilidade de controle e precisão do mesmo. Mas também pôde ser visto que a não utilização de fluido de corte (usinagem a seco) foi fundamental, nesse primeiro momento, para a alteração microestrutural, conforme resultados apresentados por Brockhoff, T, 1999 [21], mesmo que essa condição tenda a apresentar um desgaste excessivo do rebolo.

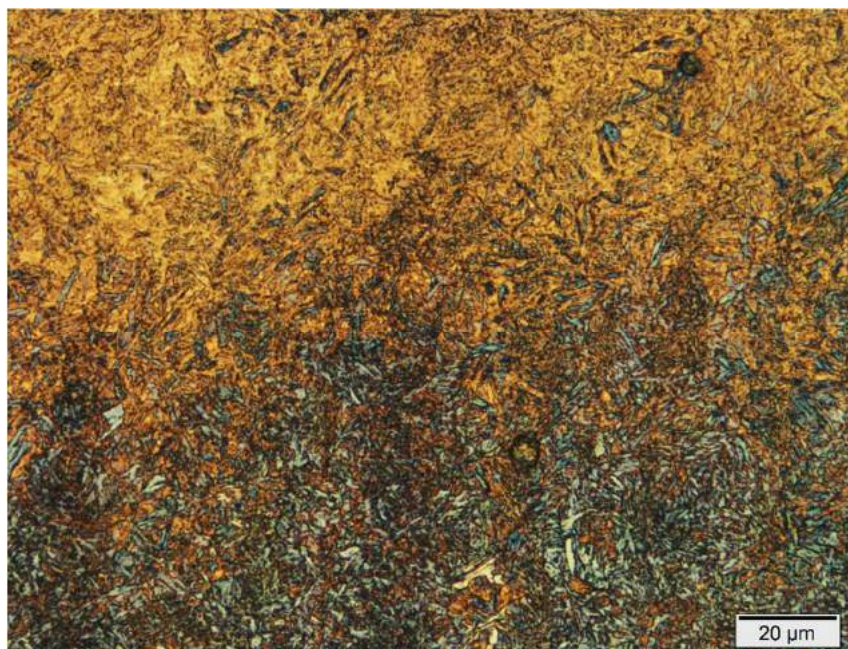
A amostra 4 foi usinada com a mesma velocidade da mesa e a profundidade teve um acréscimo, com o objetivo de aumentar a energia envolvida. Novamente não foi utilizado fluido de corte. Na figura 4.5 pode-se observar uma estrutura semelhante à da amostra anterior, porém com um pequeno aumento da região martensítica (de cor marrom). Nesta amostra pode-se observar que a camada branca vista na amostra anterior não foi formada.



(a)



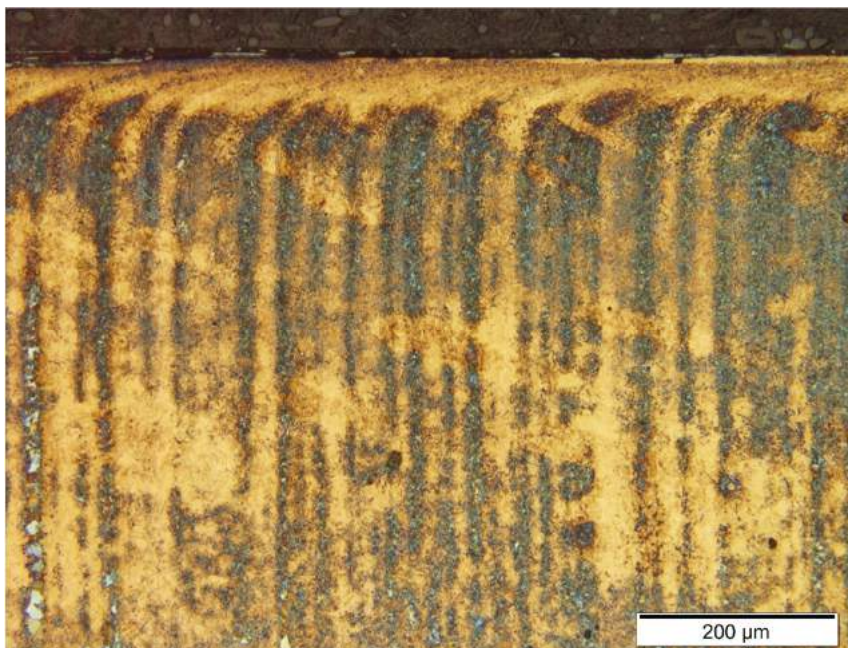
(b)



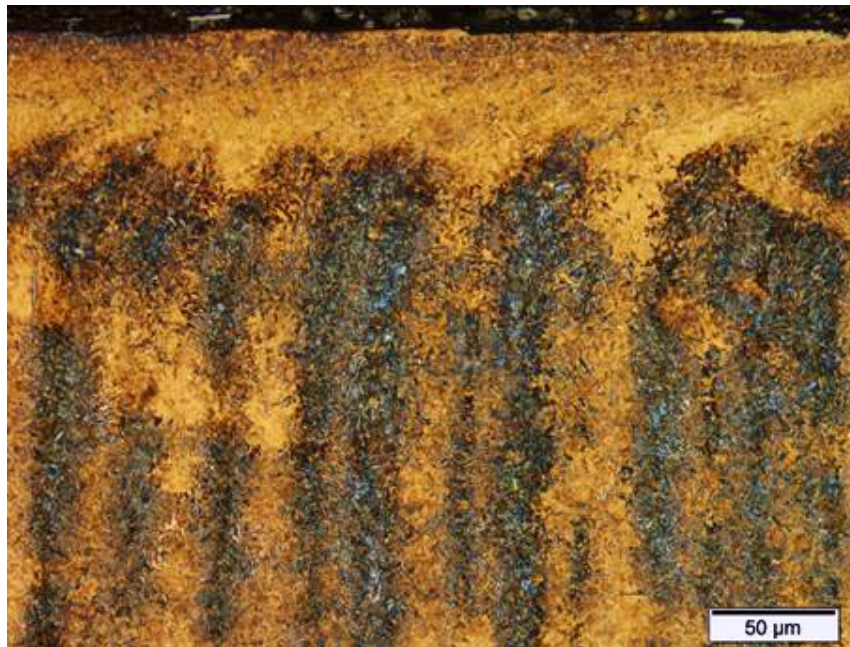
(c)

Figura 4.5 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 4, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.

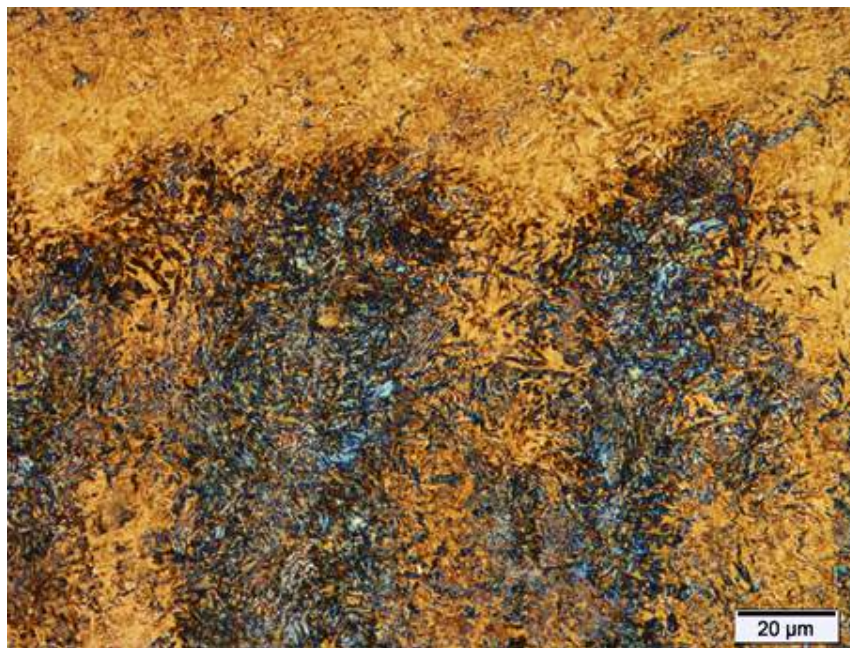
Na usinagem da amostra 5, condição com profundidade de corte de 0,80 mm pode ser observado o aumento da região de cor marrom (figura 4.6), que representa a transformação martensítica, como já era esperado devido ao aumento na profundidade de corte. Além disso, observa-se a formação de bandas, lado a lado, predominantemente bainíticas (azuladas) e predominantemente martensíticas (de cor marrom). As bandas de bainita se formaram oriundas das regiões de ferrita, enquanto as de martensita se formaram a partir das regiões perlíticas, que possuem, como citado anteriormente, maior segregação de elementos de liga, e conseqüentemente maior temperabilidade. Só foi possível observar essa formação a partir destes parâmetros devido ao maior aporte térmico.



(a)



(b)

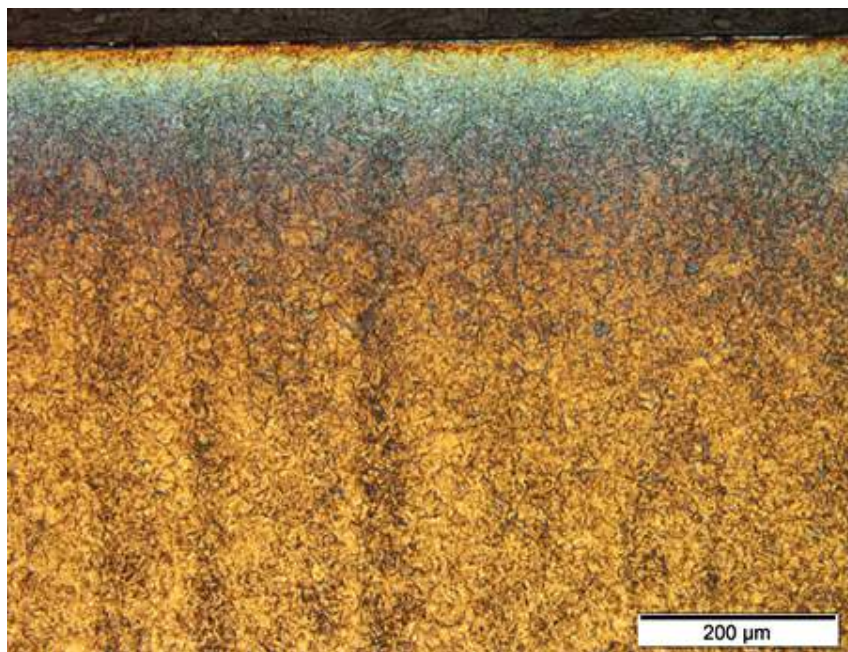


(c)

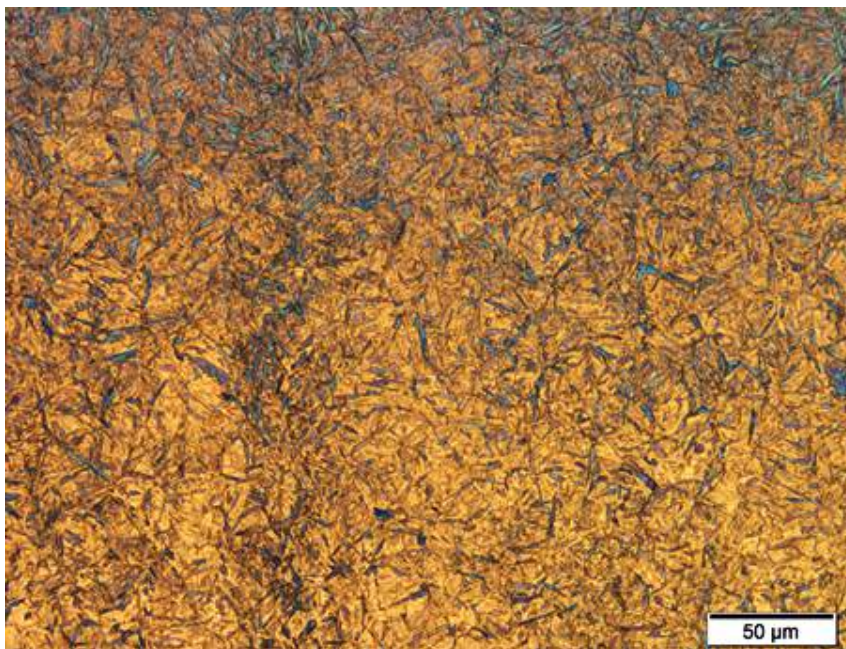
Figura 4.6 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 5, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.

A amostra 6 foi usinada com a mesma velocidade da mesa, porém esta amostra apresenta a condição mais severa em termos de profundidade de corte: 0,100 mm. A usinagem foi também realizada sem fluido de corte. Mais vez pode-se observar alteração da microestrutura, obtendo-se martensita. Para estas condições é possível observar, que em termos microestruturais, obteve-se uma estrutura mais homogênea quando compara às demais, além de uma maior formação de martensita, com a presença de pequenas agulhas de bainita, sobretudo quando se observam em aumentos maiores.

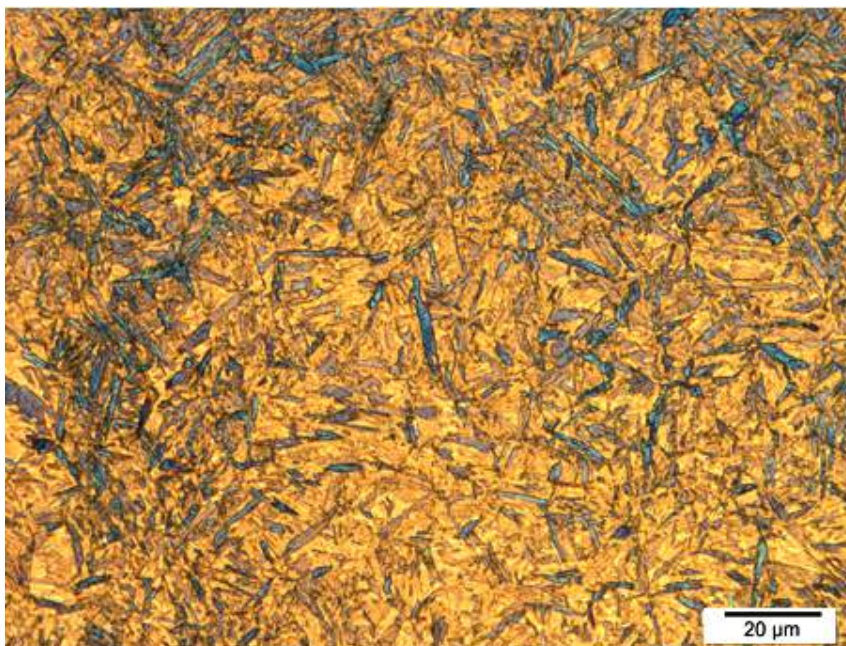
Na região próxima ao baquelite ocorre o efeito de borda, que consiste em um ataque não uniforme próximo às bordas da amostra devido a maior energia na região, e por isso o ataque apresenta uma coloração um pouco diferente. Contudo, é possível observar a formação de camada branca na superfície da amostra, adjacente à interface com o baquelite.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 - Micrografias obtidas por microscopia ótica apresentando a microestrutura da amostra 6, martensita nas regiões de cor marrom e bainita das regiões azuladas, em (a) 200X, em (b) 500X e em (c) 1000X.

A fim de caracterizar mecanicamente a formação e martensita na superfície das amostras, tão bem a profundidade atingida pela mesma, foram realizados ensaios de

microdureza. Foi avaliada a dureza na superfície usinada e um perfil de microdureza na seção transversal da peça. Desta forma foram obtidos os gráficos apresentados nas figuras 4.8 e 4.9.

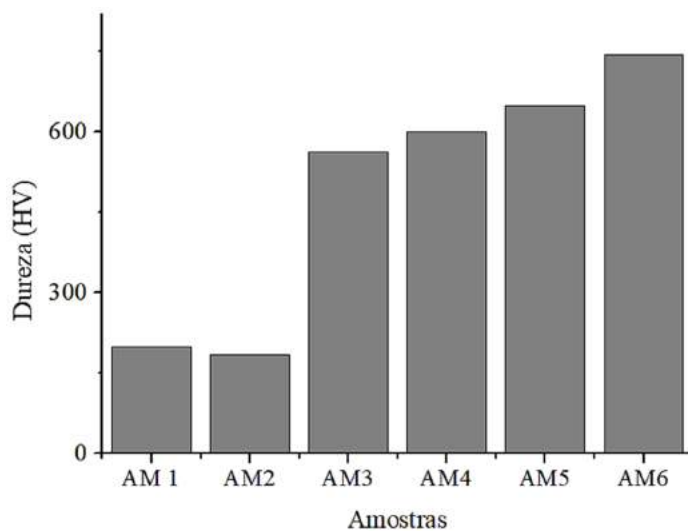


Figura 4.8 – Gráfico de dureza superficial das amostras

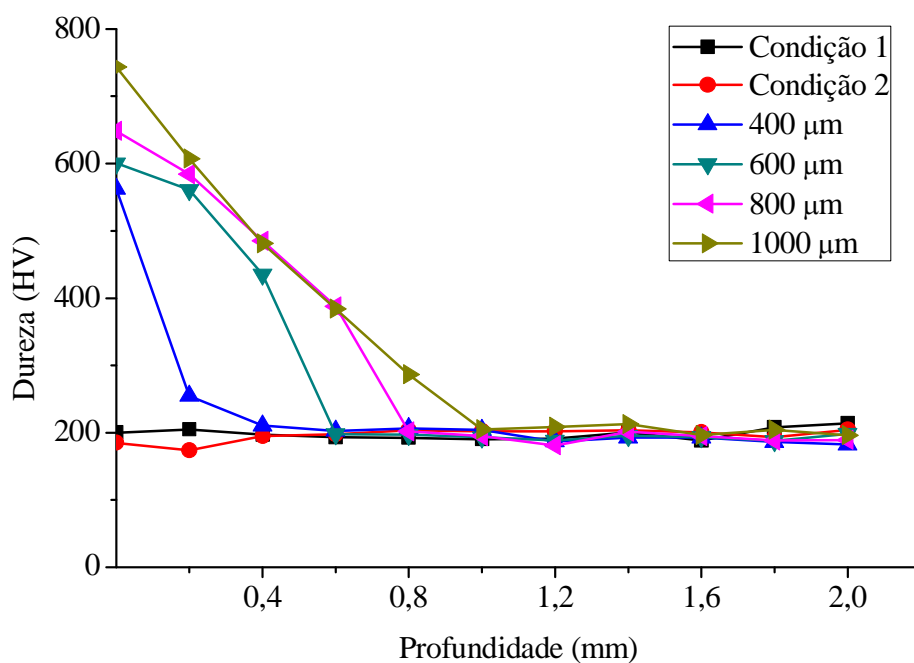


Figura 4.9 – Gráfico do ensaio de microdureza

Ao analisar o resultado das durezas superficiais fica evidente a influência da usinagem a seco no processo de endurecimento da peça, pois obteve-se uma elevação de patamar de dureza que, utilizando fluido de corte estava um pouco acima de 250 HV e sem fluido de corte

foi para o patamar de 600 HV em média. Além disso observa-se uma elevação gradativa da dureza superficial com o aumento da profundidade de corte, o que indica que esse parâmetro influencia diretamente na camada atingida no processo de retificação.

Com o gráfico do perfil de microdureza (figura 4.9) pode-se notar o comportamento da camada endurecida. Observa-se que o aumento da profundidade de corte há um aumento da profundidade atingida, pois os valores de dureza permanecem altos até 0,8 mm em condição com maiores profundidades de corte. Além disso, as durezas atingidas (de 600 HV a 700 HV em média) confirmam a formação de martensita, proveniente do processo de usinagem, pois somente com essa microestrutura é possível atingir durezas tão elevadas. Vale ressaltar que as amostras que utilizaram fluido de corte durante a usinagem apresentaram um comportamento linear ao longo de toda seção transversal. É importante destacar que as condições mais severas, com profundidade de corte maiores e usinagem a seco permitem a alteração da microestrutura, contudo prejudicam a vida útil do rebolo, fazendo que o mesmo se deteriore de forma mais rápida.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho, teve como objetivo analisar a formação de martensita na superfície usinada de uma peça de aço AISI 4340, assim como a profundidade de alcance desta transformação mediante a variação de parâmetros de corte. Para tanto foram utilizadas análises microestruturais e de microdureza, admitindo-se as seguintes conclusões:

1. É possível obter endurecimento superficial por retificação.
2. Velocidades mais altas de avanço não permitiram o aumento significativo da temperatura, não promovendo desta forma, alterações na microestrutura.
3. A condição de refrigeração é fundamental para o atingimento de temperaturas mais elevadas, permitindo desta forma, para condição a seco, a formação martensítica.
4. Velocidades de avanço mais baixas permitem o aumento da temperatura, contribuindo para alteração microestrutural.
5. A profundidade de corte foi o parâmetro que mais influenciou na profundidade atingida pelo endurecimento. Contudo, esse parâmetro é fortemente interativo com a condição de usinagem: úmida ou a seco.

Capítulo 6

Sugestões para trabalhos futuros

1. Fazer análise de tensões residuais na superfície usinada.
2. Analisar a taxa de desgaste do rebolo para condições que alterem a microestrutura do material
3. Variação do tipo de material a ser usinado
4. Comparação entre diferentes processos de têmpera superficial
5. Variação do material do rebolo em relação ao comportamento do material usinado

Capítulo 7

Referências bibliográficas

- [1] Klocke, F.; Brinksmeier, E; Evans, C; Howes, T; Inasaki, I; Minke, E; Tonshotr, H.K.; Webster, J.A.; Stuff, D.: “High-Speed Grinding - Fundamentals and State of the Art in Europe, Japan, and the USA”, *Annals of the CIRP*, v. 46, n. 2, pp. 715-724, 1997
- [2] Gâmbaro, L. S., “Proposta de otimização de processo de fabricação de peças cilíndricas por meio da têmpera por retificação”, Dissertação de pós graduação, UNIMEP, Santa Barbara d’Oeste, São Paulo, Brasil, 2006.
- [3] Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., “Processo de retificação, *Tecnologia da usinagem dos materiais*, 9 ed., capítulo 13, Rio de Janeiro, Brasil, Artliber, 2014.
- [4] Valarelli, I. D., “Análise da influência da temperatura na retificação de aços endurecidos, com rebolos superabrasivos de CBN, e sua influência na integridade superficial do material”, UNESP, Bauru, São Paulo, Brasil.
- [5] Khenafes, M.; Dotto, F. R. L.; Aguiar, P. R.; Bianchi, E. C.: “Parametrização da queima superficial no processo de retificação tangencial plana”, XII SIMPEP, Bauru, São Paulo, Brasil, 7-9 Novembro 2005
- [6] Souza, G. A., “Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia ótica”, Dissertação de mestrado, UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil, 2008
- [7] Sevale, L. G., “Avaliação da influência de tratamentos térmicos nas variações microestruturais do aço SAE 4340”, UnB, Brasília, Brasil, 2014
- [8] Callister, Jr. W. D., “Materials Science and Engineering: An Introduction”, 5 ed., London, UK, John Wiley, 2002
- [9] Cardoso, A. S. M., “Caracterização mecânica e microestrutural dos aços SAE 4340 e 300M após soldagem a laser e tratamento superficial de nitretação a plasma”, USP, Lorena, São Paulo, Brasil, 2011
- [10] Chiaverini, V., “Tecnologia Mecânica” *Materiais de Construção Mecânica*, 2 ed., São Paulo, Brasil, McGraw-Hill, 1986

- [11] Lee, W.; Su, T.: “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 87, pp. 198–206, 1999.
- [12] Klaus, M.; Edward, L., *ASM Metals Handbook Volume1: Properties and Selection: Irons steels and high performance alloys*, 10 ed., ASM International, 1990.
- [13] Malkin, S., Guo, C., “Grinding Technology”, *Theory and applications of machining with abrasives*, 2 ed., New York, USA, Industrial Press, 2008.
- [14] Catai, R. G., “Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho”, *Dissertação de Doutorado*, UNESP, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil, 2004.
- [15] Machado, A. R.; Abrão, A. M.; Coelho, R. T.; Silva, M. B., “Usinagem por abrasão”, *Teoria da usinagem dos materiais*, 2 ed., capítulo 11, Rio de Janeiro, Brasil, Blucher, 2011.
- [16] Damasceno, R. F., “Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana do aço ABNT 4340”, *Dissertação de Mestre*, UNESP, Bauru, São Paulo, Brasil, 2010.
- [17] Groover, M. P., “Retificação e outros processos abrasivos”, *Introdução aos processos de fabricação*, 1 ed., capítulo 18, Rio de Janeiro, Brasil, LTC, 2014.
- [18] Malkin, S.; Guo, C.: “Thermal Analysis of Grinding”, *Annals of the CIRP*, v. 52, n. 2, pp. 760-782, 2007
- [19] Lavine, A. S.; Malkin, S.; Jen T. C.: “Thermal Aspects of Grinding with CBN Wheels”, *Annals of the CIRP*, v. 38, n. 1, pp. 557-560, 1989.
- [20] Brinksmeier, E.; Brockhoff, T.: “Utilization of Grinding Heat as a New Heat Treatment Process”, *Annals of CIRP*, v. 45, n. 1, pp. 283 – 286, 1996
- [21] Brockhoff, T.; Brinksmeier, E.: “Grind-Hardening: A Comprehensive View”, *Annals of CIRP*, v. 48, n. 1, pp. 255 – 260, 1999
- [22] Judong, L.; Wei, Y.; Songwei, H.; Zhilong, X.: “Experimental Study on Grinding-hardening of 1060 Steel”, *Energy Procedia*, v.16, pp. 103 – 108, 2012

- [23] Zarudi, I.; Zhang, L. C.: “Mechanical property improvement of quenched steel by grinding”, *Journal of materials Science*, v. 37, pp. 3935 – 3943, 2002
- [24] Nguyen, T.; Zhang, L. C.: “Grinding-hardening using dry air and liquid nitrogen: Prediction and verification of temperature fields and hardened layer thickness”, *International Journal of Machine Tool & Manufacture*, v. 50, pp. 901 – 910, 2010
- [25] Zhang, J.; Ge, P.; Jen, T.; Zhang, L.: “Experimental and numerical studies of AISI1020 steel in grind-hardening”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 52, pp. 787 – 795, 2009
- [26] Han, Z.; Zhang, N.; Gao, D.; Yang, G.: “Research into Grinding Hardening of microalloyed Non-quenched and tempered steel”, *Journal of China University of Mining & Technology*, v. 17, pp. 239 – 241, 2007
- [27] Chryssolorius, G.; Tsiribas, K.; Salonitis, K.: “An analytical, Numerical, and Experimental Approach to Grind Hardening”, *Journal of Manufacturing Processes*, v. 7, 2005