

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

GIOVANA RAIMAR SILVA

INFLUÊNCIA DA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO AISI 4140

BELO HORIZONTE

2015

GIOVANA RAIMAR SILVA

INFLUÊNCIA DA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO AISI 4140

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Rogério Felício dos Santos

BELO HORIZONTE

2015

GIOVANA RAIMAR SILVA

INFLUÊNCIA DA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DO AÇO AISI 4140

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Rogério Felício dos Santos - Orientador

Prof. Carlos Eduardo dos Santos

Prof. Ernane Rodrigues da Silva

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer as várias pessoas que me apoiaram e me ajudaram no decorrer deste trabalho, porém algumas merecem aqui destaque especial.

Ao Professor Rogério Felício dos Santos que se dispôs prontamente a me orientar nesta tarefa com dedicação, apoio e conhecimento.

Ao colega Douglas Sena pela amizade, ajuda e colaboração na ausência de professores disponíveis para tal no Laboratório de Metalografia do CEFET-MG.

Ao Professor Wellington Lopes pelo auxílio com o equipamento de dureza.

Ao professor Carlos Eduardo que possibilitou o acesso ao Laboratório de Manufatura da Engenharia Mecânica da PUC-Minas.

Ao técnico da PUC-Contagem Marcelino e a aluna Thaís pelo acesso e auxílio na realização do ensaio de microdureza Vickers.

A todos que de uma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho, o meu agradecimento.

RESUMO

Dentre os diversos materiais utilizados na fabricação de componentes como eixo, que exigem média ou alta solicitação mecânica, se destaca o aço AISI 4140, devido a suas propriedades intermediárias de dureza, resistência e tenacidade após beneficiamento.

Uma grande preocupação do engenheiro de materiais é a microestrutura final dos materiais metálicos obtida, de tal forma que o desempenho do componente dependerá inteiramente desse fator. O processo de retífica culmina em elevadas temperaturas, sendo estas transmitidas a peça e responsável por alterações em sua microestrutura.

O presente trabalho objetiva avaliar a influência da usinagem por abrasão na microestrutura do aço AISI 4140 normalizado, temperado e beneficiado. Amostras cilíndricas serão submetidas à esses tratamentos térmicos, seguido pelo processo de usinagem por abrasão que juntamente com ensaios metalográficos, de dureza e rugosidade permitirão a análise das propriedades e microestrutura obtidas.

Palavras-chaves: Aço AISI 4140. Usinagem por abrasão. Condição microestrutural. Tratamentos térmicos.

ABSTRACT

Among the various materials used in the manufacture of shaft-type components that require medium or high mechanical stress, stands the steel AISI 4140, due to its intermediate properties of hardness, strength and toughness after processing.

A major concern of the materials engineer is the final microstructure of the obtained metallic material, such that the component performance depend entirely on this factor. The grinding process culminates at high temperatures, which are transmitted to play and responsible for alterations in microstructure.

This study aims to evaluate the influence of machining by abrasion on the microstructure of the steel AISI 4140 standard, seasoned and processed. Cylindrical samples are then subjected to which of these heat treatments, followed by abrasion machining process along with metallographic tests, hardness and roughness enable the analysis of the obtained microstructure and properties.

Keywords: Steel AISI 4140. Machining by abrasion. Microstructural condition. Heat treatments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Microestruturas do aço AISI 4140 (a) normalizado (b) beneficiado.....	15
Figura 2 -Diagrama TTT e TRC para o aço AISI 4140.....	18
Figura 3 -Ilustração do processo de retificação cilíndrica externa.....	23
Figura 4 -Aplicação usual do fluido de corte.....	26
Figura 5 -Tensões residuais originadas pelo processo de usinagem por abrasão.....	27
Figura 6 - Parâmetro Ra, Rt e Rz de rugosidade.....	30
Figura 7 -Características dos ensaios de dureza em função do método de medição.....	31
Figura 8 -Fluxograma com os procedimentos realizados.....	33
Figura 9 -Corpos-de-prova conforme foram adquiridos.....	34
Figura 10 -Corpo-de-prova fixado as castanhas do torno mecânico.....	35
Figura 11 -Retífica universal.....	36
Figura 12 -Corpo-de-prova durante processo de retificação.....	37
Figura 13 -Resultado do pH para a lubri-refrigeração utilizada	37
Figura 14 -Microscópio ótico.....	39
Figura 15 -Microdurômetro Shimadzu.....	40
Figura 16 -Rugosidade da amostra 1	42
Figura 17 -Rugosidade da amostra 2.....	42
Figura 18 -Rugosidade da amostra 3.....	43
Figura 19 -Rugosidade da amostra 4.....	43
Figura 20 -Rugosidade da amostra 5.....	44
Figura 21 -Rugosidade da amostra 6.....	44
Figura 22 -Rugosidade da amostra 7.....	45
Figura 23 -Rugosidade da amostra 8.....	45
Figura 24 -Rugosidade da amostra 9.....	46
Figura 25 -Parâmetro Ra médio para os diferentes tratamentos térmicos.....	47
Figura 26 -Parâmetro Rt médio para os diferentes tratamentos térmicos.....	47
Figura 27 -Parâmetro Rz médio para os diferentes tratamentos térmicos.....	48
Figura 28 -Gráfico comparativo de dureza.....	50
Figura 29 -Impressões produzidas pelo ensaio de microdureza na amostra beneficiada, aumento de 400x.....	50
Figura 30 -Microdureza da amostra beneficiada.....	51

Figura 31 -Micrografia do aço AISI 4140 normalizado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes.....	52
Figura 32 -Micrografia do aço AISI 4140 temperado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes.....	52
Figura 33 -Micrografia do aço AISI 4140 beneficiado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes.....	53
Figura 34 -Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 normalizado, ampliada 200 vezes.....	53
Figura 35 -Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 temperado, ampliada 200 vezes.....	54
Figura 36 -Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 beneficiado, ampliada 200 vezes.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do aço AISI 4140.....	13
Tabela 2- Durezas obtidas para o aço AISI 4140.....	20
Tabela 3- Composição química do aço AISI 4140 adquirido.....	34
Tabela 4- Valores de microdureza Vickers encontrados.....	49

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO.....	10
2- OBJETIVOS.....	11
3-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1-Aços.....	12
3.1.1-Aço AISI 4140.....	13
3.2-Microestrutura.....	14
3.3- Tratamento Térmico.....	15
3.3.1- Normalização.....	20
3.3.2- Têmpera.....	20
3.3.3- Beneficiamento.....	21
3.4-Retificação.....	22
3.4.1-Retificação Cilíndrica Externa.....	22
3.5-Técnicas de Caracterização.....	28
3.5.1- Rugosidade.....	28
3.5.2- Microdureza.....	30
3.5.3- Metalografia.....	31
4- METODOLOGIA.....	33
4.1-Material.....	33
4.2-Preparação dos corpos-de-prova.....	34
4.2.1-Tratamento térmico aplicado.....	35
4.2.2-Retificação cilíndrica externa.....	35
4.3-Análises experimentais.....	38
4.3.1-Rugosidade.....	38
4.3.2-Análise metalográfica.....	38
4.3.3-Dureza.....	39
5-RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5.1-Rugosidade.....	41
5.2-Dureza.....	48
5.3-Metalografia e microscopia ótica.....	51
6- CONCLUSÕES.....	56
6.1-Sugestões para trabalhos futuros.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Os eixos têm grande importância na indústria e na engenharia, uma vez que são elementos mecânicos utilizados para articular um ou mais elementos de máquinas. A escolha de um material que passe por todos os processos de produção, e ainda assegure as propriedades requeridas deve ser bastante minuciosa a fim de evitar falhas inesperadas do componente em operação.

O aço, devido a sua excelente combinação de propriedades mecânicas, que ainda podem ser modificadas variando-se o tipo e concentração dos elementos de liga aliado aos tratamentos térmicos aplicáveis, se mostra a mais versátil e mais importante das ligas metálicas. As propriedades destes estão relacionadas, principalmente, à sua microestrutura. O comportamento mecânico destes materiais pode sofrer mudanças de acordo com variações na sua estrutura e microestrutura, como por exemplo: tamanho do grão, deformações plásticas, textura, etc.

A usinagem por abrasão é normalmente utilizada como operação final da linha de produção e, devido as elevadas temperaturas atingidas em processo, pode acarretar danos térmicos às peças usinadas, bem como alterações microestruturais. Entretanto seu elevado grau de precisão dimensional, somado à excelente qualidade de superfície usinada faz com que esse processo, na maioria das vezes, não possa ser substituído por outros processos de produção.

Diante do exposto nota-se a importância do estudo do comportamento do material frente ao processo de usinagem por abrasão à que este deve ser submetido.

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência da usinagem por abrasão na qualidade da superfície usinada, variação microestrutural e de microdureza em amostras de aço AISI 4140 normalizados, temperados e beneficiados, submetidos ao processo de retificação cilíndrica externa subsequente a esses tratamentos térmicos específicos.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades e a microestrutura do aço AISI 4140 em função dos diferentes tratamentos térmicos aplicados, seguido pelo processo de usinagem por abrasão, também conhecido como retificação.

Amostras em barras cilíndricas serão então, submetidas cada quais aos tratamentos térmicos de normalização, têmpera e beneficiamento, e depois será realizado o processo de usinagem por abrasão. Essas mesmas amostras passarão por análises de microestrutura, dureza e rugosidade para uma análise comparativa entre as modificações observadas de acordo com o tratamento térmico aplicado.

Com isso, dentre as variáveis do processo de usinagem por abrasão, será analisada a influência da retificação cilíndrica externa sobre amostras de aço AISI 4140, segundo sua microestrutura, qualidade da superfície e dureza, em função do tratamento térmico aplicado. Será investigado as alterações decorrentes das elevadas temperaturas alcançadas pelo processo de retificação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços

Por definição, aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes do processo de fabricação. Outros elementos de liga também podem ser adicionados propositalmente quando se deseja um ou mais dos seguintes efeitos:

- a) Aumentar a dureza e resistência mecânica;
- b) Conferir resistência uniforme através de toda a seção em peças de grandes dimensões;
- c) Diminuir o peso, como consequência do aumento da resistência;
- d) Conferir resistência à corrosão;
- e) Aumentar a resistência ao calor;
- f) Aumentar resistência ao desgaste;
- g) Melhorar as propriedades elétricas e magnéticas (CHIAVERINI, 2008).

Devido a grande variedade de aços existentes no mercado, foram criados sistemas para facilitar sua identificação. A classificação mais abrangente é aquela que considera a composição química dos aços e, dentre os sistemas mais conhecidos estão o “American Iron and Steel Institute (AISI)”, o “American Society for Testing Materials (ASTM)” e por fim o “*Society of Automotive Engineers (SAE)*”. Nesses sistemas os dois primeiros algarismos correspondem aos elementos de liga presentes, enquanto os subsequentes, o teor de carbono. A engenharia e a indústria brasileira também dispõe de um sistema de classificação dos aços baseado nos sistemas SAE e AISI, elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (CHIAVERINI, 2008).

Uma classificação muito utilizada é feita de acordo com a concentração de carbono presente nos aços, e pode ser dividida em aços baixo carbono, aços médio carbono, e aços alto carbono.

Aços baixo carbono geralmente contém menos do que cerca de 0,25% em peso de carbono, como uma consequência, estas ligas são relativamente macias, porém se destacam a ductilidade e tenacidade; são usináveis, soldáveis e, de todos os aços, são os de produção mais

barata. Aplicações típicas incluem componentes do corpo do automóvel, formas estruturais, e chapas que são usadas em tubulações, edifícios e pontes (CALLISTER, 2006).

Aços médio carbono têm concentrações de carbono entre cerca de 0,25 e 0,60% em peso. Estas ligas podem ser tratadas termicamente para melhorar suas propriedades mecânicas. Aplicações incluem rodas de trens, trilhos de ferrovia, engrenagens, virabrequins, eixos e outras partes de máquinas.

Aços alto carbono possuem teores de carbono entre 0,60 e 1,4% em peso, são mais duros, mais fortes e ainda menos dúcteis. Geralmente são usados numa condição temperada e revenida e, portanto, são especialmente resistentes à abrasão. São utilizados como ferramentas de corte e matrizes para transformação mecânica e conformação de materiais, bem como em facas, navalhas, lâminas de serra, molas e fios de alta resistência mecânica (CALLISTER, 2006).

3.1.1 Aço AISI 4140

O aço AISI 4140, também conhecido como aço cromo-molibdênio, é classificado como aço médio carbono, ou aço ligado para beneficiamento. Com temperabilidade média, ele é bastante utilizado na fabricação de peças para a indústria de petróleo, automotiva, siderúrgica e de bens de capital, onde se deseja uma boa combinação de resistência mecânica e resistência à fratura. Geralmente em aplicações de engenharia é usado na condição “temperado e revenido” ou “normalizado, temperado e revenido”, este último quando é necessário assegurar elevados níveis de tenacidade (DUFOUR, 2002).

A sua grande vantagem na fabricação de peças do tipo eixo sobre os outros aços médio carbono está em sua melhor capacidade de endurecimento em maiores seções transversais. A sua composição química básica pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço AISI 4140

C%	Cr%	Mo%	Si%	Mn%
0,40	0,95	0,20	0,25	0,90

Fonte: VILLARES METALS, 2004.

Também definido como SAE 4140; ABNT 4140; ASTM A322 Tipo 4140; DIN WNr 1.725, o aço AISI 4140 tem como principais elementos o carbono, o cromo e o molibdênio.

O carbono (C) é o elemento de liga mais importante nos aços e muito influente em sua composição. Tem como função conferir ao aço dureza, aumentar o limite de resistência à tração e a temperabilidade, entretanto diminui sua tenacidade e soldabilidade (METALS HANDBOOK, 2001).

O cromo (Cr) aumenta a resistência à corrosão e à oxidação, aumenta a endurecibilidade, melhora a resistência em altas temperaturas e torna o aço mais resistente ao desgaste (METALS HANDBOOK, 2001).

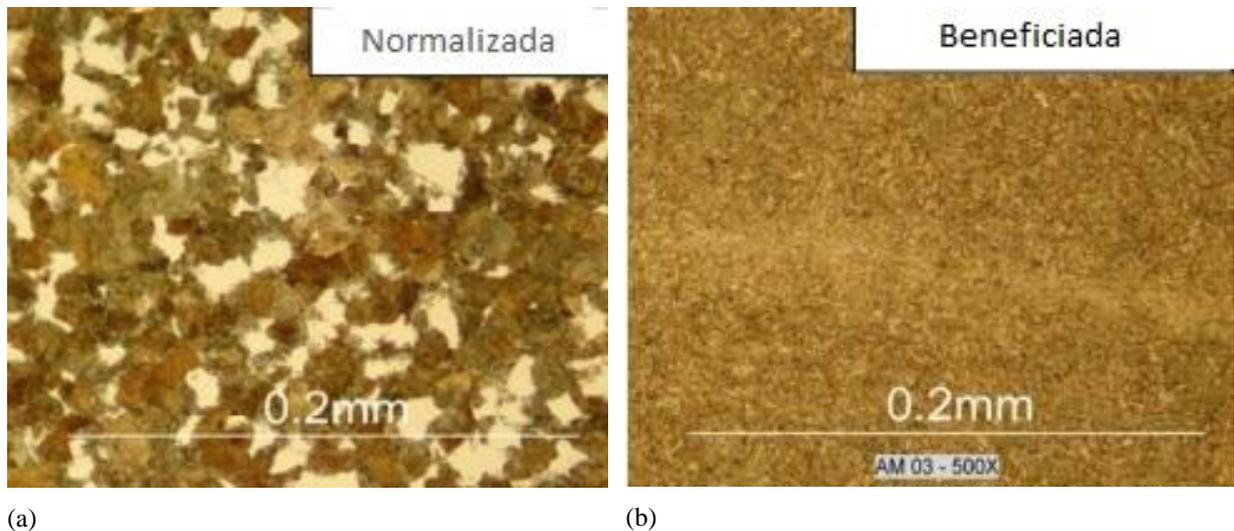
O molibdênio (Mo) ajuda a restringir o crescimento do grão, aumenta a profundidade da têmpera, eleva a dureza e a resistência a quente (METALS HANDBOOK, 2001).

3.2 Microestrutura

Dentre os aspectos mais importantes dos materiais de uso na engenharia está a microestrutura. Ela é uma consequência da composição química, história térmica e processamento sofridos pelo aço, e influencia significativamente nas suas propriedades e conseqüentemente no seu desempenho. Dessa forma, estudando a microestrutura de um material obtém-se informações importantes, que associadas à composição e ao método de conformação mecânica, permitem prever suas características e o seu comportamento durante a aplicação (MARTINS et al. 2007).

Informações sobre tamanho de grão, inclusões, impurezas, fases secundárias, porosidades, segregação e defeitos superficiais dão uma boa idéia de como o material era originalmente e das transformações sofridas por processamentos subsequentes. As análises microestruturais permitem obter informações de como o material foi produzido, bem como da sua qualidade resultante (MARTINS et al. 2007). A figura 1 mostra dois exemplos de microestrutura do aço AISI 4140, uma normalizada e a outra beneficiada.

Figura 1 - Microestruturas do aço AISI 4140 (a) normalizado e (b) beneficiado



Fonte: TEDESCO, 2007.

3.3 Tratamento Térmico

Uma possibilidade de se adequar as propriedades mecânicas, físicas e mesmo químicas dos materiais, para que este possa ser aplicado em uma condição específica, é através do emprego de tratamentos térmicos.

O tratamento térmico utilizado em metais ou ligas metálicas é definido como o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento com o intuito de alterar suas propriedades ou mesmo conferir-lhes características que se julgam necessárias (COLPAERT, 2008).

As propriedades dos aços dependem, a princípio, de sua estrutura. Os tratamentos térmicos alteram, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços tendo como consequência alterações mais ou menos pronunciadas de suas propriedades. Tais alterações estão relacionadas a uma série de fenômenos estruturais que podem ocorrer durante o processo térmico, por exemplo, a recristalização, a decomposição da austenita, a recuperação, a formação de precipitados e as transformações de fase. A estrutura obtida apresenta características próprias que se transfere ao aço conforme a combinação de estruturas presentes. Em geral, a melhoria de uma ou mais propriedades é conseguida, pelo tratamento térmico, porém pode ocasionar o comprometimento de outras (COLPAERT, 2008).

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos em aços envolvem:

- a) Remoção de tensões residuais decorrentes de processos mecânicos de conformação ou térmicos;
- b) Refino da microestrutura;
- c) Aumento ou redução de dureza;
- d) Aumento ou redução da resistência mecânica;
- e) Aumento da ductilidade;
- f) Melhoria da usinabilidade;
- g) Aumento da resistência ao desgaste;
- h) Melhoria da resistência à corrosão;
- i) Melhoria da resistência à fluência;
- j) Modificação de propriedades elétricas e magnéticas;
- k) Remoção de gases após operações de recobrimento por meio de processos galvânicos (CALLISTER, 2006).

Para realização de um tratamento térmico deve-se levar em conta alguns fatores de grande influência no resultado final. Considerando o tratamento térmico um ciclo de tempo/temperatura, ressalta-se o aquecimento, o tempo de permanência à temperatura, o meio e velocidade de resfriamento e a atmosfera do recinto de aquecimento (COLPAERT, 2008).

O aquecimento, ou seja, o procedimento adotado para que o material atinja a temperatura final desejada, deve ser o mais uniforme possível e a temperatura de patamar do tratamento térmico deve ser homogênea por toda peça. Aquecimentos não uniformes podem levar à distorção, acúmulo de tensões ou mesmo à fratura da peça (CHIAVERINI, 2008).

A velocidade de resfriamento é o fator mais importante, é ele quem determinará efetivamente a estrutura final, bem como suas propriedades. Pela taxa de resfriamento obtém-se desde a perlita grosseira de baixa resistência mecânica e baixa dureza até a martensita que é o constituinte mais duro obtido. Entretanto, sabe-se que a obtenção desses constituintes não é função apenas dessa taxa, e também da composição do aço, das dimensões da peça, entre outros (CHIAVERINI, 1987).

Na escolha do meio de resfriamento, deve ser considerado o tipo de estrutura final desejada a uma determinada profundidade, bem como a forma e secção da peça. Os meios mais usuais são o próprio forno, o ar, e meios líquidos, tais como a água, o óleo natural ou mineral e a salmoura. O resfriamento mais brando é aquele realizado pelo forno e se torna mais severo a medida que se passa para o ar ou um meio líquido, em que a extrema agitação proporciona os meios mais drásticos de resfriamento (CHIAVERINI, 1987).

Quanto a atmosfera do forno, ambiente no qual a peça estará submersa, deve-se atentar ao efeito nocivo do oxigênio aliado a temperatura, uma vez que este pode provocar a oxidação da peça e a sua descarbonetação que consiste em uma camada mais mole na superfície do metal. O uso de uma atmosfera protetora ou controlada tem como fim evitar tais efeitos (CHIAVERINI, 1987). Na descarbonetação o carbono presente na superfície do metal irá reagir com os gases da atmosfera do forno, a elevada mobilidade do mesmo devido as elevadas temperaturas de austenitização, faz com que o carbono difunda para a superfície movido pelo gradiente de sua concentração, e se perca, deixando uma camada superficial pobre de carbono no metal (CHIAVERINI, 2008).

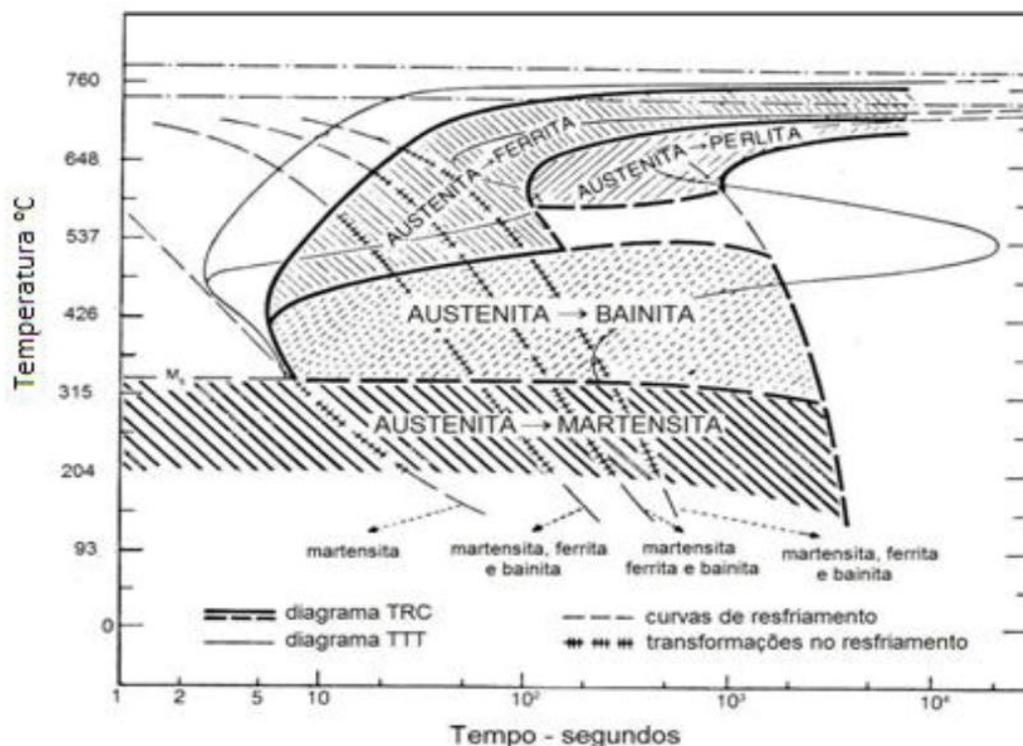
O tempo de manutenção à temperatura de patamar é aquele tempo necessário para que toda peça atinja a temperatura desejada, e deve ser apenas o suficiente para permitir a dissolução das fases, uma vez em que o excesso promove o aumento do tamanho de grão, e contribui para a oxidação e a descarbonetação (CHIAVERINI, 2008).

Sabe-se que os tratamentos térmicos dos aços ocorrem fora das condições de equilíbrio devido as elevadas velocidades de resfriamento envolvidas, o que inviabiliza o uso do diagrama de fases, uma vez que estes representam apenas condições de resfriamento muito lentos. Quando o aço é resfriado mais rapidamente, não há tempo suficiente para a movimentação atômica ocorrer por completa, podendo haver a formação de novos constituintes (CHIAVERINI, 2008).

As transformações de fase a partir da austenita no resfriamento dos aços podem dar origem a diferentes microconstituintes, dependendo da velocidade em que ocorre esse resfriamento. Caso este seja lento o suficiente para que haja difusão atômica, pode ser observada a formação das fases ferrita, perlita e cementita, já para resfriamentos mais bruscos observa-se a presença de constituintes metaestáveis como a bainita e a martensita (CHIAVERINI, 2008).

Para análise e estudo dessas diferentes velocidades de resfriamento dos aços faz-se então o uso dos diagramas tempo-temperatura-transformação (TTT) e transformação no resfriamento contínuo (TRC), mostrados na figura 2, que tem como ponto de partida a fase austenita e suas transformações em função do tempo em temperaturas constantes, e em diferentes taxas de resfriamento. Os diagramas TTT são utilizados em caso de transformações isotérmicas, e os diagramas TRC quando o resfriamento se dá de maneira contínua (CHIAVERINI, 2008).

Figura 2 - Diagrama TTT e TRC para o aço AISI 4140



Fonte: KRAUSS, 2000.

A transformação da austenita em outro constituinte pode ocorrer por difusão, cisalhamento ou ambos. O processo de difusão, que envolve a movimentação e rearranjo dos átomos, é lento, enquanto o processo de cisalhamento, que envolve a deformação da rede cristalina, é praticamente instantâneo (CHIAVERINI, 2008).

A fase ferrita é formada por difusão e sua morfologia é bastante variável de acordo com a taxa de resfriamento, passando da forma equiaxial em resfriamento lento, até a forma de agulhas em resfriamentos mais severos (CHIAVERINI, 2008).

A perlita é uma mistura de duas fases, ferrita e cementita, sob a forma de lamelas paralelas. A ferrita é menos compacta que a austenita por ter estrutura cúbica de corpo centrado, ao invés de estrutura cúbica de face centrada, e conseqüentemente tem menor capacidade de dissolver o carbono (CHIAVERINI, 2008).

A bainita que pode ser classificada como superior ou inferior de acordo com a temperatura na qual é formada, é fruto de um processo que envolve tanto difusão quanto forças de cisalhamento. A bainita superior envolve a formação de agulhas de ferrita com a precipitação de cementita entre elas, e a bainita inferior por ser formada em temperaturas menores, apresenta cementita não só ao entorno das agulhas, como também em seu interior, uma vez que a temperatura não é suficiente para a segregação do carbono para a austenita adjacente (CHIAVERINI, 2008).

A martensita é uma fase metaestável proveniente do resfriamento brusco da austenita, e sua transformação se dá por cisalhamento da estrutura apenas, uma vez que não há tempo para os átomos de carbono e demais elementos de liga do metal se transformarem em ferrita ou cementita. A estrutura cristalina dessa fase é a tetragonal de corpo centrado e se encontra saturada de carbono (CHIAVERINI, 2008). A martensita apresenta-se na forma de ripas em aços de menor teor de carbono, e na forma de agulhas em aços com maiores teores de carbono. É caracterizada por sua elevada dureza, que aumenta quanto maior for o teor de carbono, e baixa ductilidade relativo à distorção provocada pelos átomos de carbono no retículo cristalino (SILVA E MEI, 2010).

Os tratamentos térmicos mais usuais para o aço AISI 4140 são os de recozimento, normalização e têmpera. Quando é necessário recozer o aço AISI 4140, deve-se aquecê-lo lentamente e uniformemente entre 680 e 700°C, mantê-lo nessa temperatura por aproximadamente 1 hora por polegada e resfriá-lo lentamente dentro do forno. Já no processo de normalização aquece-o lenta e uniformemente entre 890 e 910°C, mantêm essa temperatura por 0,5h por polegada e resfria-o ao ar. Na têmpera, a temperatura de trabalho deve ser entre 860 e 880°C, mantêm-se esta por 0,5h por polegada, em seguida resfria-se em meios fluidos com agitação, como a água ou óleos apropriados (VILLARES METALS, 2004)

A tabela 2 mostra as durezas Vickers obtidas por Kraft (2013) mediante tratamento térmico à uma determinada temperatura e tempo do aço AISI 4140.

Tabela 2 - Durezas obtidas para o aço AISI 4140

Tratamento Térmico	Temperatura(°C)	Tempo (minutos)	Dureza (Vickers)
Normalizado	860	90	243-254
Têmpera e Revenido	690	90	243-260
Têmpera e Revenido	490	90	423-434
Têmpera e Revenido	250	90	560-577

Fonte: KRAFT, 2013.

3.3.1 Normalização

A normalização é um processo de tratamento térmico que pode ser considerado tanto do ponto de vista térmico quanto microestrutural. O seu processo corresponde a um ciclo de aquecimento de austenitização seguido de arrefecimento ou ainda ar ligeiramente agitado. Para ser caracterizado como tal, o aquecimento realizado deve produzir uma fase austenítica homogênea antes do arrefecimento (COLPAERT, 2008).

O objetivo de normalizar varia consideravelmente, ele pode aumentar ou diminuir a dureza do aço dependendo de sua história térmica e mecânica. Ele é indicado para se obter uma estrutura homogênea e refinada, e melhorar a resistência e a tenacidade dos aços. Melhora na usinabilidade e modificações nas tensões residuais estão também entre os feitos da normalização (COLPAERT, 2008; METALS HANDBOOK, 1991).

3.3.2 Têmpera

A têmpera consiste em aquecer o aço até a temperatura adequada para se obter uma microestrutura austenítica, manter a peça neste patamar de temperatura por um determinado tempo e em seguida resfriar esta em um meio que proporcione uma velocidade suficientemente rápida para evitar as transformações perlíticas e bainíticas, obtendo então a estrutura metaestável martensítica (COLPAERT, 2008).

As variáveis associadas à têmpera que afetam a microestrutura e as propriedades mecânicas do aço temperado são a temperatura de têmpera, o tempo a essa temperatura, a taxa de resfriamento a partir da temperatura de patamar e a composição do aço, incluindo o teor de carbono, teor dos elementos de liga e elementos residuais. Já a distribuição da dureza e a profundidade do endurecimento de uma peça temperada depende tanto da temperabilidade do

aço, quanto do tamanho e forma da peça, da temperatura de austenitização e do meio de têmpera. Segundo Silva e Mei (2010) a quantidade de carbono presente no aço está diretamente relacionado com a quantidade de martensita formada e dureza pós-têmpera. Para que o efeito endurecedor da têmpera seja significativo, os aços devem apresentar um teor de carbono superior a 0,3% (COLPAERT, 2008; SILVA E MEI, 2010).

Nos aços temperados a microestrutura consiste fundamentalmente de martensita, e suas propriedades são determinadas principalmente pelo tamanho, forma, composição e distribuição dos carbonetos formados.

Durante o resfriamento, a severidade com que este ocorre na têmpera faz surgir gradientes bastantes acentuados entre o centro e a superfície do componente e, conseqüentemente, surgem gradientes de tensões associados as diferentes expansões ou contrações térmicas. Também ocorre dramática variação de volume associada à transformação martensítica que ocorre à medida que diferentes regiões vão atingindo a temperatura final da transformação (COLPAERT, 2008; METALS HANDBOOK, 1991).

3.3.3 Beneficiamento

As microestruturas martensíticas, obtidas pelo processo de têmpera, apresentam geralmente um nível de tensões residuais excessivos e baixa ductilidade e tenacidade para permitir seu emprego na maior parte das aplicações de engenharia. Peças que permanecem nestas condições de grande tensionamento interno são muito propícias a trincas. Sendo assim, faz-se necessário realizar um outro tratamento térmico subsequente, chamado revenimento, que conduz a alterações que normalmente diminuem a dureza, a resistência a tração e à deformação, e aumentam a ductilidade e a tenacidade. Os tratamentos térmicos de têmpera e de revenimento feitos em seqüência em um material é chamado de beneficiamento (COLPAERT, 2008).

Para alcançar valores aceitáveis aliando resistência mecânica à tenacidade, deve-se proceder o revenimento logo após a têmpera. Esse tratamento consiste em aquecer o aço uniformemente até uma temperatura abaixo daquela de austenitização, permanecendo nela até que esta se equalize por toda a peça (COLPAERT, 2008).

O processo de revenimento se dá pela difusão através da energia fornecida sob forma de calor. Sendo a martensita uma estrutura metaestável, os átomos de carbono que antes estavam presentes nos interstícios, precipitam como carbonetos, deixando de estarem supersaturados na estrutura, conduzindo então a uma redução da dureza e alívio de tensões (COLPAERT, 2008; SILVA E MEI, 2010).

3.4 Retificação

O processo de retificação, também chamado de usinagem por abrasão, tem sido considerado um dos mais importantes processos da manufatura, tendo como objetivo melhorar o acabamento superficial e garantir a integridade das peças acabadas. É normalmente utilizado como operação final da linha de produção de componentes que requerem alta precisão, e por isso se torna uma etapa crítica, haja visto que uma falha nesta etapa compromete todo processo que a antecedeu (SOARES E OLIVEIRA, 2002).

Além disso, a retificação é considerada uma das operações mais complexas do processo de usinagem não só pela sua dificuldade de reprodutibilidade, como também a relação entre os diversos parâmetros, como velocidade de corte e velocidade de avanço, que influenciam uns aos outros (SOARES E OLIVEIRA, 2002).

O processo de retificação é nomeado segundo a superfície usinada, já as formas geométricas que podem ser obtidas com o uso do rebolo, que é a ferramenta de corte deste processo, são a cilíndrica externa e interna, plana e plana rotativa (DINIZ E MARCONDES, 2000).

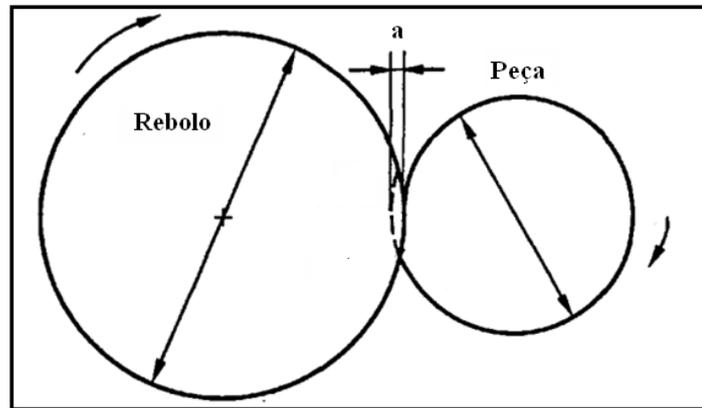
3.4.1 Retificação Cilíndrica Externa

O processo de retificação cilíndrica externa, utilizado na fabricação de elementos cilíndricos, consiste em um rebolo que com alta velocidade periférica é levado até a superfície da peça, que também se encontra em rotação, porém em sentido contrário (MALKIN E CHIU, 1993).

A correlação entre os parâmetros, profundidade de corte, comprimento de contato, velocidade de corte da ferramenta, velocidade de mergulho, rotação da peça, diâmetro do rebolo, diâmetro da peça, força normal à superfície de contato peça/rebolo e força tangencial à superfície de contato, caracterizam essa operação (MALKIN E CHIU, 1993).

A figura 3 apresenta esse processo de retificação cilíndrica externa, sendo ‘a’ a profundidade de corte.

Figura 3 - Ilustração do processo de Retificação Cilíndrica Externa



Fonte: Malkin e Chiu, 1993. Adaptada.

A formação de cavaco nesse processo ocorre em duas etapas, na primeira, denominada fase elástica, ocorre o escorregamento do grão abrasivo sobre a peça, já na segunda fase tem-se as deformações plásticas e formação do cavaco, sendo que concomitantemente ocorre também o desgaste dos grãos abrasivos do rebolo, porém em menor intensidade (MALKIN E CHIU, 1993).

Com relação ao processo de usinagem por abrasão no aço AISI 4140, a ferramenta de corte mais apropriada são os rebolos de Nitreto Cúbico de Boro (CBN), utilizados em materiais ferrosos e de alta dureza, sua liga facilita a manutenção do perfil do rebolo e possui porosidade para troca de calor e refrigeração, evitando o surgimento de microtrincas na peça (CATAI, 2003).

A velocidade de corte também é um fator determinante, uma vez que influencia diretamente a vida do rebolo, a capacidade de remoção e qualidade do acabamento da peça. Sendo assim, essa deve ser mantida dentro de certos limites, mais especificamente entre 80 e 120mm/min, com avanço de 0,25mm/min e profundidade de corte de 1mm, com auxílio de refrigeração. O fluido de corte mais recomendado nessa operação são os óleos sintéticos ou solúveis (CATAI, 2003).

A ferramenta de corte utilizada no processo de retificação é conhecida como rebolo, ele é responsável por dar qualidade superficial à peça por meio da remoção do cavaco. Sua

superfície é composta por grãos abrasivos unidos através de um ligante, e poros vazios (CATAI, 2003).

O desempenho desse processo está diretamente ligado a ferramenta de corte e também aos parâmetros que a influenciam como a força de corte, velocidade do rebolo e distribuição das arestas de corte sobre a superfície do rebolo (CATAI, 2003).

O ligante ou aglomerante é o componente que mantém os grãos abrasivos unidos, exercendo assim grande influência na resistência e vida útil do rebolo bem como no comportamento elástico dos grãos (WANG, 2008).

A união conseguida deve ser forte suficiente para suportar as forças de corte, não apresentar reação química com o fluido de corte utilizado, resistir a altas temperaturas e suportar as forças centrífugas sem se desintegrar, além de oferecer rigidez ao rebolo e ser capaz de reter os grãos durante o processo (WANG, 2008).

A granulometria dos materiais abrasivos é outro fator a ser considerado, eles representam o tamanho médio dos grãos que constituem o rebolo e são classificados em grosso, médio, fino e muito fino, de acordo com seu “mesh”. Para operações que requerem acabamentos melhores são utilizados rebolos de grão abrasivos menores, já os abrasivos mais grosseiros são utilizados em operações de desbaste ou semi acabamento (YOUSSEF E HOFY, 2008).

Os rebolos possuem uma especificação técnica, normatizada pela ABNT, composta por letras e números que identificam as características dos mesmos. A primeira letra ou conjunto de letras identificam o tipo de abrasivo utilizado, e deve ser selecionado em função das propriedades físicas do material a ser usinado. A letra (A) indica um abrasivo de óxido de alumínio cinza, (AA) óxido de alumínio branco, (DA) mistura proporcional de óxido de alumínio cinza e óxido de alumínio branco, (DR) óxido de alumínio rosa, (SA) óxido de alumínio azul, (C) carboneto de silício preto e (GC) carbureto de silício verde (STEMMER, 1995).

O número subsequente refere-se ao tamanho do grão segundo norma ABNT NBR 11568:1990, que classifica o grão através de um sistema de peneiras, em que o número do tamanho de grão corresponde à divisão linear da área de uma polegada quadrada (STEMMER, 1995).

A letra subsequente classifica a dureza da liga, ou seja, sua capacidade em reter as partículas abrasivas do rebolo, e variam de (E) muito mole até (Z) extra duro. O grau de dureza ideal para determinado trabalho é aquele em que os grãos abrasivos se soltam à medida que perdem seu poder de corte (STEMMER, 1995).

O número subsequente, que varia de 1 a 15, representa a estrutura do rebolo através da relação de espaçamento dos grãos abrasivos entre si, o número 1 indica uma estrutura mais densa, e o número 15 uma estrutura mais aberta (STEMMER, 1995).

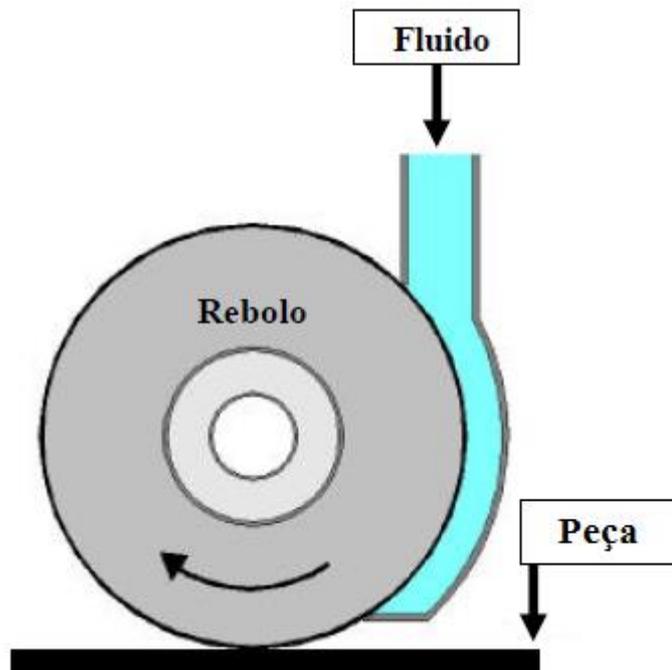
E por fim a letra subsequente indica o material da liga que une os grãos abrasivos entre si, que podem ser resinoide, vitrificado, silicato, borracha, metálico ou shelac (YOUSSEF E HOFY, 2008).

Os fluidos de corte são fluidos aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado a fim de facilitar a operação de corte, eles mostraram um grande auxílio no processo de corte dos metais, e a partir desta constatação passou-se a desenvolver vários tipos para atender aos requisitos da operação (LIMA, 2013).

A aplicação mais usual dos fluidos, ilustrada na figura 4, que seria na interface peça/rebolo, possibilita o aumento da produtividade, uma vez que a velocidade de corte, taxas de avanço e profundidade de corte podem ser aumentadas devido as funções exercidas pelo mesmo. Além disso, aumenta-se também a vida útil da ferramenta e a precisão dimensional da peça, como também, reduz a rugosidade e a potência consumida durante o processo de usinagem (SILLIMAN, 1992).

Cada tipo de fluido de corte apresenta características específicas, vantagens e limitações distintas, não existe um fluido que reúna todos os diferentes requisitos exigidos para cada uma das operações existentes, o que se tem são fluidos mais ou menos versáteis, dependendo do tipo de operação e do seu grau de severidade (LIMA, 2013).

Figura 4 - Aplicação usual do fluido de corte



Fonte: Silliman, 1992. Adaptada.

A função de um fluido de corte depende da operação de usinagem a ser realizada e da severidade, porém suas funções básicas concentram: a refrigeração da ferramenta, da peça e do cavaco gerado, lubrificação da região de contato peça/ferramenta, reduzindo a fricção, a erosão e o desgaste da ferramenta, que conseqüentemente possibilita um aumento da vida útil da mesma e contribui para a redução da geração de calor, poder de lavagem com a expulsão dos cavacos da região de corte e no caso de operações de retificação, diminui a tendência do entupimento dos poros do rebolo, e por fim, proteção anticorrosiva (LIMA, 2013).

Basicamente estes se dividem em quatro grupos, que são os óleos de corte, fluidos de cortes solúveis em água, gases, e pastas ou lubrificantes sólidos. Os óleos de corte possuem como composto básico o óleo mineral ou óleo integral de origem vegetal, podendo ser usados no estado puro ou aditivado. Os fluidos de corte solúveis em água transformam-se emulsões ou soluções quando são adicionados à água, dependendo da constituição básica do fluido solúvel concentrado (LIMA, 2013).

Devido as propriedades físicas de alto calor específico, e alta condutividade térmica, a água é considerada o melhor fluido refrigerante e, portanto, a combinação de propriedades entre a

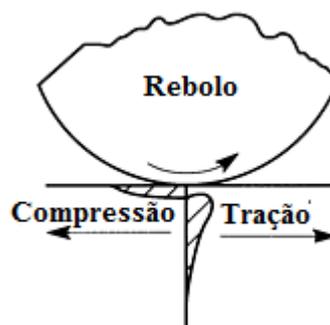
água e o concentrado de fluido de corte proporciona uma refrigeração eficiente junto com um moderado poder refrigerante (LIMA, 2013).

Os gases inertes têm como vantagens a possibilidade de uma visão clara da região de corte, além de aumento do poder refrigerante e ausência de contaminação da peça e dos cavacos, entretanto devem-se evitar gradientes térmicos devido ao empenamento, distorções e tensões residuais que estes podem provocar. As pastas e lubrificantes sólidos são aplicados manualmente sobre a peça e na ferramenta, são mais usuais em operações de mandrilamento, e em alguns casos, são impregnados nos rebolos já no seu processo de fabricação (RUNGE E DUARTE, 1990).

Um dos principais indicadores para avaliação do fluido de corte é o pH, que consiste em um índice de acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio. Um decréscimo dele está ligado a proliferação de microrganismos, que liberam ácidos e gás carbônico em seu metabolismo, acidificando o meio e provocando queda das propriedades anticorrosivas (TAKAHASHI, 2012). Para Runge e Duarte (1990) uma emulsão satisfatória deve ter pH acima de 8,7, ou entre 7,8 e 8,7 se for adicionado biocidas para controle de bactérias.

Os processos de retificação podem trazer modificações na microestrutura do material usinado, principalmente pelas solicitações térmicas e mecânicas sofridas. Os efeitos térmicos tendem a ocasionar uma tensão residual de tração, enquanto os efeitos mecânicos tendem a ocasionar uma tensão residual de compressão. A figura 5 ilustra as tensões residuais originadas pela usinagem por abrasão (MINKE, 1999).

Figura 5 - Tensões residuais originadas pelo processo de usinagem por abrasão



Fonte: METALS HANDBOOK, 1991. Adaptada.

O processo de retificação pode acarretar danos térmicos as peças, que segundo Minke (1999) são decorrentes das elevadas temperaturas que aparecem na região de corte, e muitas vezes são mal dissipadas.

O dano mais comum observado é a queima superficial provocada por uma mudança localizada de fase no material da peça, que tem como consequência a formação de uma camada de óxido. Outro dano são as tensões residuais que se manifestam nas adjacências da superfície da peça. Essas são geradas por três efeitos básicos: a expansão térmica e contração do material durante a retificação, transformações de fases devido às altas temperaturas provindas da usinagem e às deformações plásticas causadas pelos grãos abrasivos do rebolo (MINKE, 1999).

As alterações microestruturais também são um dano térmico. Provocado pelas elevadas temperaturas atingidas no processo, podendo ultrapassar 700°C, que acrescidos de um resfriamento rápido pode gerar camadas de martensita. Estas por serem extremamente frágeis e metaestáveis, são indesejáveis e podem causar defeitos na peça, como trincas e variações dimensionais e mudança de propriedades (MINKE, 1999).

3.5 Técnicas de caracterização

De acordo com o Conselho Nacional da Pesquisa, a caracterização é a descrição da composição e estrutura inclusive os defeitos, se houverem, de um material que são significantes para uma preparação particular, estudo das propriedades e sua possível reprodução. Ela é de fundamental importância na análise de um material.

Várias são as técnicas que podem ser utilizadas para a caracterização completa de um material, sendo escolhidas uma ou outra de acordo com a natureza das amostras, e das informações que se deseja obter.

3.5.1 Rugosidade

Segundo Kopac e Babor (1999) a superfície de uma peça apresenta de maneira geral desvios aleatórios, saliências ou irregularidades que podem ser macro ou micro geométricas, independente da aparência lisa e brilhante que aparente a superfície ou o quanto suave tenha

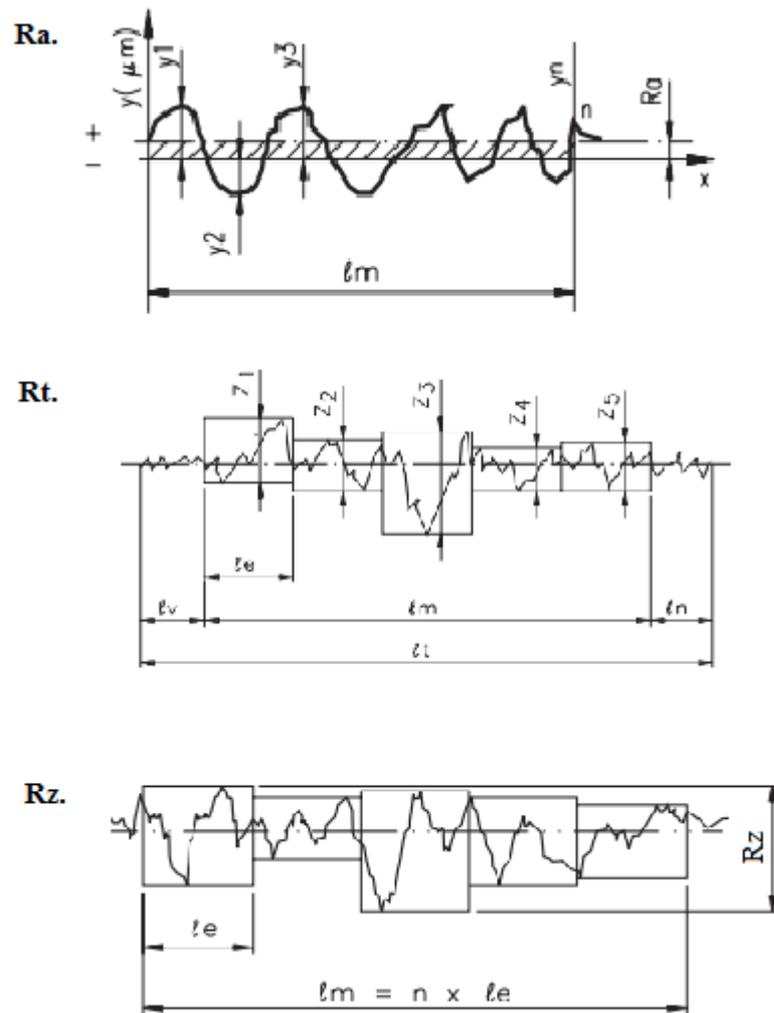
sido o processo de usinagem. Sendo assim, nota-se sempre a necessidade de determinar valores que designam características da superfície.

A rugosidade é, dentre os métodos que quantificam a integridade superficial de uma peça, o procedimento mais adequado, não só pela sua rapidez como também por determinar a qualidade do acabamento superficial. Sua quantificação é feita pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos e suas variáveis estão relacionadas com a precisão de ajuste da máquina, condições de usinagem e tolerâncias de fabricação (KOPAC E BAHOR, 1999).

Existem diferentes parâmetros de rugosidade, regidos no Brasil pela norma ABNT-NBR 4287-2002, usados para identificar particularidades desejáveis em cada superfície de acordo com a aplicação a que se destina.

A rugosidade média, conhecida como R_a , corresponde à média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento, ou seja dos picos e dos vales, em um determinado percurso de medição, é o parâmetro mais utilizado e fornece um controle contínuo da rugosidade em uma linha de produção, de preferência em superfícies de pouca responsabilidade, uma vez que não identifica picos ou vales atípicos. O parâmetro R_t , denominado altura total do perfil, é definido como o maior valor das rugosidades parciais que se apresenta no percurso de medição, informa a máxima deterioração da superfície vertical da peça. Já o parâmetro R_z ou altura máxima do perfil corresponde a distância vertical da maior altura de um pico e da profundidade de um vale dentro de todo comprimento medido, independente dos valores de rugosidade parcial, é portanto mais abrangente que R_t (PIRATELLI, 2011). Tais parâmetros são mostrados na figura 6.

Figura 6 – Parâmetro Ra, Rt e Rz de rugosidade



Fonte: PIRATELLI, 2011. Adaptada.

3.5.2 Microdureza

Durante operações de usinagem as alterações microestruturais são geralmente acompanhadas por alterações de dureza.

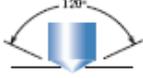
Segundo Souza (1982) a dureza é uma propriedade mecânica amplamente utilizada para a caracterização e controle da qualidade dos materiais, tanto nos estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas, quanto na comparação entre os diversos materiais.

Os métodos mais conhecidos para análise qualitativa e quantitativa da dureza de um material são: Rockwell, Brinell, microdureza Knoop, Vicker, dentre outros, e suas técnicas se baseiam

em pequenos penetradores que são forçados contra a superfície do material a ser analisado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação, faz-se a medição da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual é associada a uma escala com um valor de dureza.

A figura 7 representa um esquema das características do ensaio de dureza, na qual é mostrada o penetrador, que corresponde à ferramenta utilizada para comprimir o material analisado, em vista lateral e de topo, assim como o cálculo necessário à determinação do valor de dureza para diferentes métodos.

Figura 7 - Características dos ensaios de dureza em função do método de medição

Penetrador	Forma da impressão		Carga	Fórmulas Dureza
	Vista lateral	Vista de topo		
Esfera com 10mm em aço ou carbeto de tungstênio			P	$= \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Pirâmide de diamante			P	$= 1.854P/d^2$
Pirâmide de diamante			P	$= 142P/d^2$
Esfera de aço com 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol. de diâmetro e cone de diamante			60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Rockwell superficial 30 kg } 45 kg }	

Fonte: CALLISTER, 2006.

Quanto mais macio um material, maior será a impressão e a profundidade, e menor será o valor de dureza. Como indicado na figura 7, cada método possui penetradores distintos, bem como os respectivos índices de dureza, não sendo possível a comparação direta entre uma e outra escala de dureza. No caso do método de microdureza Vickers ele é utilizado em pesquisas devido ao penetrador incidir em uma região muito pequena do material (SOUZA, 1982).

3.5.3 Metalografia

As análises microestruturais são de tamanha importância para a caracterização de um material. Através delas é possível identificar as possíveis alterações microestruturais envolvidas, tais como, o surgimento de microtrincas ou macrotrincas, mudanças de fase e tensões residuais que podem comprometer a integridade do componente usinado.

Diversas são as técnicas para a realização da análise microestrutural, em geral, a preparação das amostras é feita em espécimes lixadas, polidas e atacadas quimicamente, a fim de se conseguir uma superfície plana, livre de riscos e que revele as características da microestrutura de interesse (MESQUITA, 1992). Os métodos mais utilizados neste tipo de análise são a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a Microscopia Óptica (OLIVEIRA, 2006).

O Microscópio Eletrônico de Varredura é um dos instrumentos mais versáteis para investigar a microestrutura dos materiais, com ele é possível analisar a topografia de uma amostra sólida obtendo informações sobre precipitados, fases e tamanho de grão, além da possibilidade de análise da superfície fraturada. Já o Microscópio Óptico permite a observação dos elementos como uma extensão natural da observação a olho nu, fato esse conseguido através da ampliação por uma lente ou um conjunto delas (COLPAERT, 2008).

Na microscopia ótica, o contraste da imagem é resultado da diferença de reflectividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Para materiais que são opacos a luz visível, como é o caso dos metais, da maioria dos cerâmicos e polímeros, somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da microestrutura (OLIVEIRA, 2006).

Com as imagens obtidas pela microscopia ótica é possível a determinação qualitativa do tamanho de grão, formato do grão, área de fronteira do grão por unidade de área e espaços vazios (ASM, 2004; OLIVEIRA, 2006).

4 METODOLOGIA

Os procedimentos experimentais presentes neste capítulo foram conduzidos nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, no laboratório de Manufatura da Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) e no laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais unidade Contagem.

A figura 8 ilustra um fluxograma com os procedimentos realizados neste trabalho a fim de elucidar e metodizar a seqüência de experimentos realizados nos corpos-de-prova.

Figura 8 – Fluxograma com os procedimentos realizados



Fonte: AUTOR, 2015.

4.1 Material

As amostras do aço AISI 4140 foram adquiridas em nove barras, mostradas na figura 9, de 1.¼” de diâmetro e 100 milímetros de comprimento cada, normalizadas e com certificado de conformidade de sua composição química conforme composição mostrada na tabela 3.

Figura 9 – Corpos-de-prova conforme foram adquiridos



Fonte: AUTOR, 2015.

Tabela 3 – Composição química do aço AISI 4140 adquirido

C%	Cr%	Mo%	Si%	Mn%
0,39	0,96	0,19	0,29	0,94

Fonte: VILLARES METALS, 2015.

4.2 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram preparados em um torno mecânico convencional, até a medida média de diâmetro de 28,23mm e desvio padrão de 0,33mm, por desbaste, e comprimento médio de 99,19mm e desvio padrão de 0,30mm, por faceamento. Foram também feitos furo nos centros para posterior retificação entre pontas e chanfros nas extremidades para evitar quinas vivas.

Dos 99,19mm de comprimento, foram usados uma média de 31,46mm, por meio de um rebaixo na peça, para fixação do grampo de arraste, para possibilitar a usinagem entre pontas. O comprimento nominal final da peça foi de $67,73 \pm 0,60$ mm, e sobre esta medida foi feita a operação de retificação e posteriores análises.

A figura 10 mostra o corpo-de-prova fixado às castanhas do torno após o processo de retirada de quinas vivas.

Figura 10 – Corpo-de-prova fixado as castanhas do torno mecânico



Fonte: AUTOR, 2015.

4.2.1 Tratamento térmico aplicado

Após os corpos-de-prova serem preparados, foram realizados os tratamentos térmicos de têmpera e beneficiamento, sem o emprego de uma atmosfera controlada, no Laboratório de Tratamentos Térmicos do CEFET-MG, seguindo dados existentes na literatura. De acordo com Chandler (1995), para a condição de têmpera, o corpo-de-prova deve ser aquecido até a temperatura de austenitização (860°C), permanecer nessa temperatura por 1 hora e 20 minutos, correspondentes ao seu diâmetro, e resfriar em óleo sem agitação. E para o revenimento, o corpo-de-prova, após ser temperado, deve ser aquecido em temperaturas entre 200°C e 700°C , permanecer nessa temperatura por 1 hora e 20 minutos, correspondentes ao seu diâmetro, e resfriar no forno. Neste caso foi usado uma temperatura de 300°C para o revenimento. No fim obtiveram-se três corpos-de-prova normalizados conforme adquirido, três temperados e três beneficiados.

4.2.2 Retificação cilíndrica externa

Na retificação cilíndrica externa dos corpos-de-prova foi utilizado um rebolo de 320mm diâmetro e de especificação técnica DA46L5V, sendo o grão abrasivo uma mistura proporcional de óxido de alumínio cinza e óxido de alumínio branco, tamanho médio de grão

46, dureza média, estrutura média, e de liga vitrificada. O rebolo passou pela operação de dressagem antes de iniciar o processo de retificação e a sequência escolhida para a retificação dos corpos-de-prova foi segundo o tratamento térmico aplicado, sendo os normalizados retificados primeiro, seguido dos beneficiados e dos temperados.

A máquina ferramenta utilizada na usinagem dos corpos-de-prova foi uma retífica universal mostrada na figura 11, com rotação de 125rpm. Os pontos do cabeçote para fixação do corpo-de-prova foram feitos com ângulo de 60° , a mesa foi alinhada com auxílio de um relógio comparador de base magnética de resolução 0,01mm, e verificada a cilíndricidade através dos diâmetros ao longo dos corpos-de-prova já retificadas, mensurados com ajuda de um micrômetro. A velocidade de avanço foi de 2550 mm/min e foi retirado 0,25 mm de material no raio de cada corpo-de-prova.

Figura 11 – Retífica universal



Fonte: AUTOR, 2015.

A figura 12 mostra o corpo-de-prova durante a operação de retificação cilíndrica externa.

Figura 12 – Corpo-de-prova durante processo de retificação



Fonte: AUTOR, 2015.

O fluido de corte utilizado como lubri-refrigerante do processo foi o Syntilo 9902, caracterizado como um fluido sintético bioestável, com propriedades anticorrosivas, isento de cloro, nitritos e fenóis. O tanque da máquina tem capacidade de 130L, sendo colocado uma mistura nova de água/fluido no início do processo em concentração de 2%. A mistura obteve um pH 8, ou seja, alcalino, medido após o processo de retificação através do papel tornassol universal como mostrado na figura 13.

Figura 13 – Resultado do pH para a lubri-refrigeração utilizada.



Fonte: AUTOR, 2015.

4.3 Análises experimentais

4.3.1 Rugosidade

A qualidade da superfície usinada foi analisada por meio do ensaio de rugosidade. O equipamento utilizado foi um rugosímetro com ponta de diamante, conectado a um computador que, através do software Taly Profile Gold, fornecia o perfil de rugosidade da amostra, além de diversos parâmetros, dentre eles os coletados, Ra, Rt e Rz. As medições foram realizadas em cinco comprimentos distintos de cada amostra e o cut off foi de 0,8mm. De posse dos resultados foi calculado a média dos parâmetros de rugosidade para cada tratamento térmico aplicado e seus respectivos desvios-padrão.

4.3.2 Análise metalográfica

A preparação das amostras para a análise metalográfica foi realizada no Laboratório de Metalografia do CEFET-MG, cortando-se um corpo de prova de cada amostra para o embutimento a frio em uma resina polimérica, depois esses corpos de prova seguiram para a etapa de lixamento, passando pelas lixas de mesh 120, 240, 320, 400 e 600, depois polidas com pasta de diamante de 9 μ m e 3 μ m, e atacadas quimicamente com Nital 3% para revelar a microestrutura.

As metalografias foram analisadas por meio do microscópio metalográfico mostrado na figura 14 com os aumentos de 200 e 400 vezes.

Figura 14 – Microscópio ótico

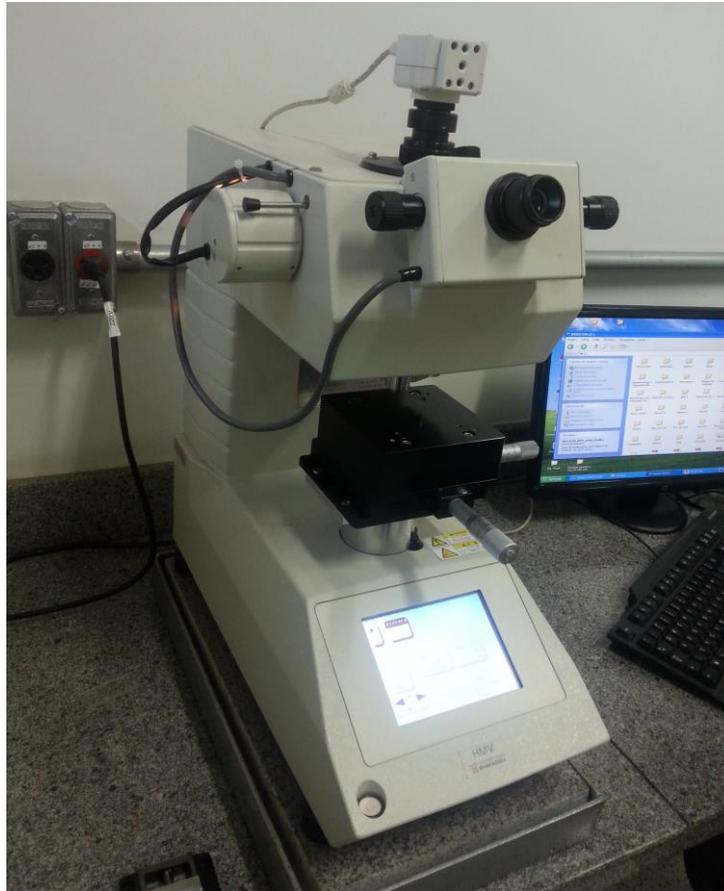


Fonte: AUTOR, 2015.

4.3.3 Dureza

Para avaliar a dureza final das amostras, estas já embutidas a frio e atacadas quimicamente seguiram para o medidor de micro-dureza Vickers, mostrado na figura 15, localizado no Laboratório da PUC unidade Contagem. Foi utilizada uma carga de 98,07mN ou 10gf durante 20 segundos. Foram feitas três impressões no centro das amostras e três próximo a borda retificada para cada condição de tratamento térmico, sendo que para as amostras beneficiadas, que mostraram impressões mais bem definidas, foi feito um perfil de impressões próximo a borda em direção ao centro.

Figura 15 – Microdurômetro



Fonte: AUTOR, 2015.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os efeitos da retificação cilíndrica externa no aço AISI 4140 com diferentes tratamentos térmicos, por meio dos resultados dos ensaios experimentais e suas análises.

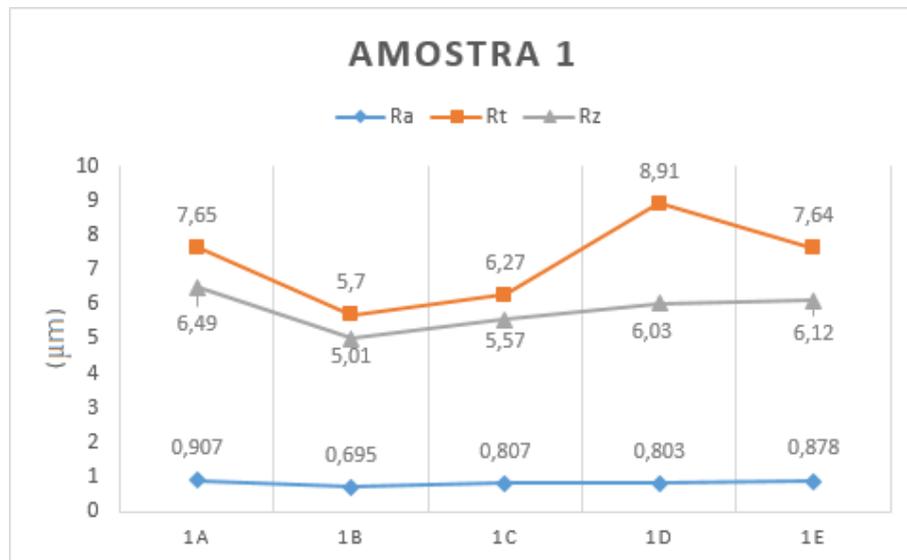
5.1 Rugosidade

As medições dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z foram realizadas em 5 comprimentos distintos de cada amostra. Os resultados coletados foram plotados em gráficos, para melhor visualização, e exibidos nas figuras 16 a 24, sendo as três primeiras normalizadas, e as três últimas beneficiadas.

É visto que o parâmetro R_a se mostra mais constante para todas amostras quando comparado aos parâmetros R_t e R_z . Essa diferença se dá pela própria definição dos mesmos, uma vez que segundo Piratelli (2011), R_a corresponde a média aritmética de todos picos e vales, já R_t informa a maior deterioração vertical da superfície e R_z , ainda mais abrangente, informa a distância vertical do maior pico somado ao maior vale encontrado.

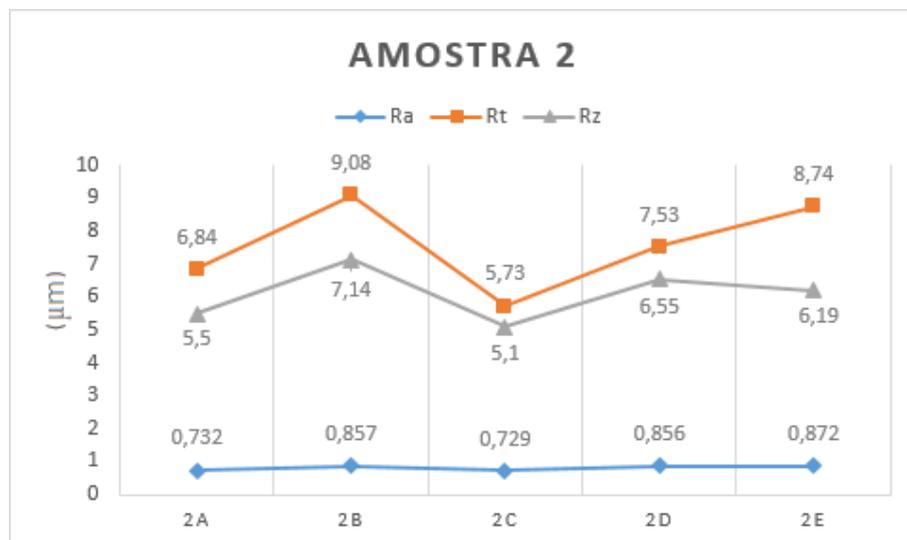
Sendo assim alterações acentuadas nos valores de R_t ou R_z , muitas vezes não foram percebidas por R_a , isso mostra que naquele comprimento há uma saliência ou irregularidade maior que as demais, porém ela é amenizada por várias irregularidades menores de sentido oposto.

Figura 16 – Rugosidade da amostra 1



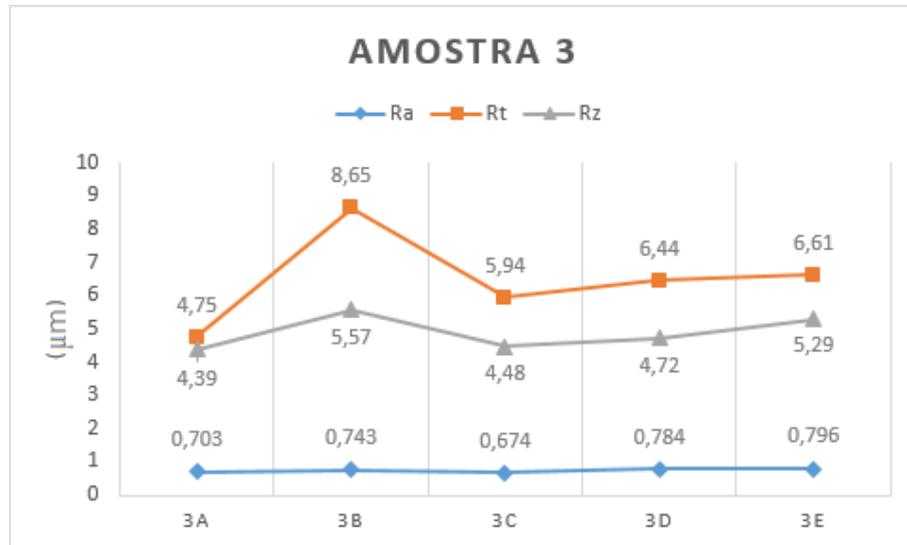
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 17 – Rugosidade da amostra 2



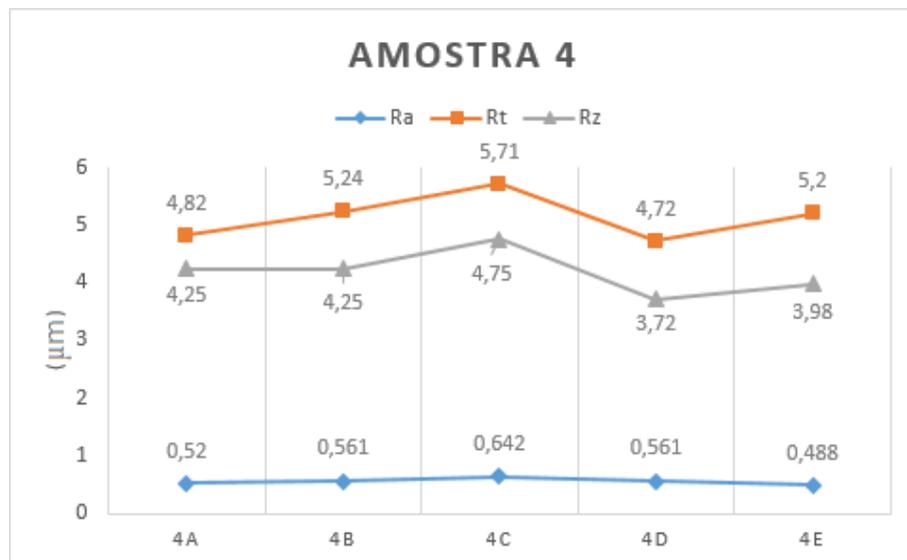
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 18 – Rugosidade da amostra 3



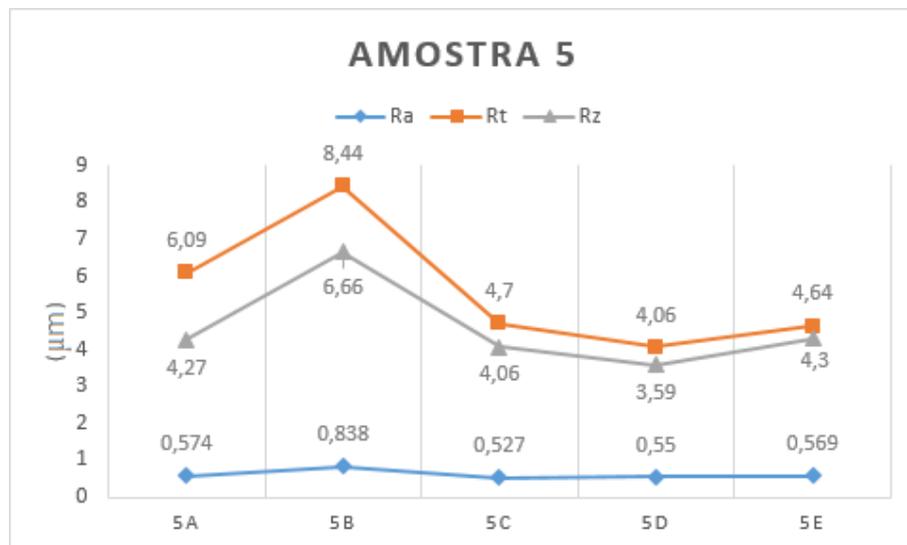
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 19 – Rugosidade da amostra 4



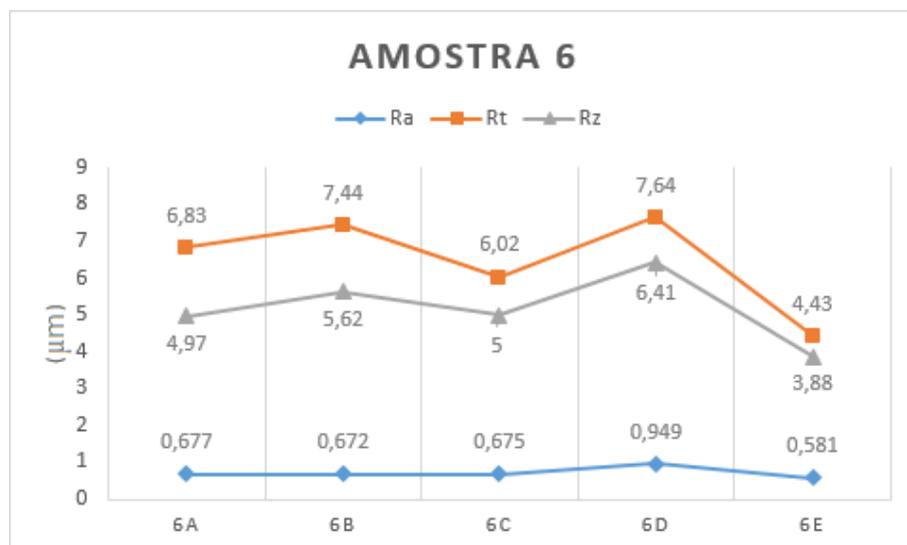
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 20 – Rugosidade da amostra 5



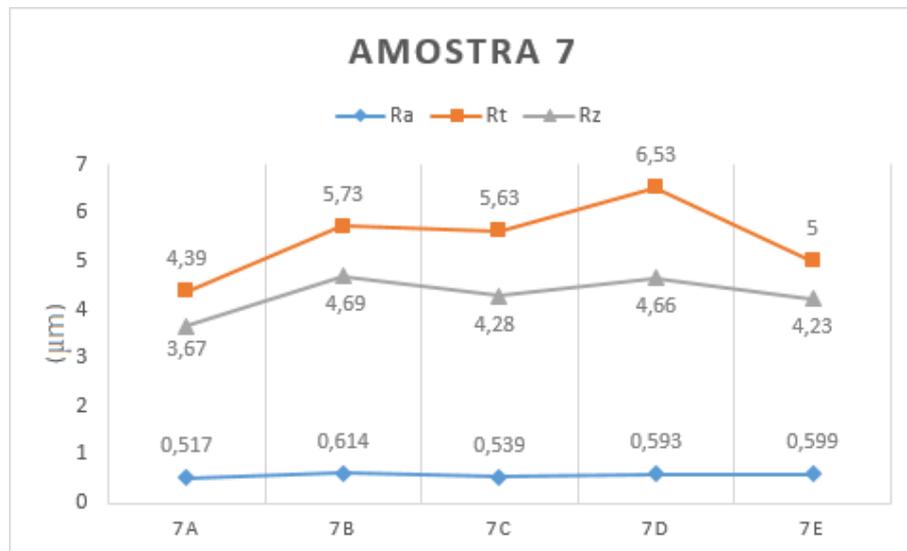
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 21 – Rugosidade da amostra 6



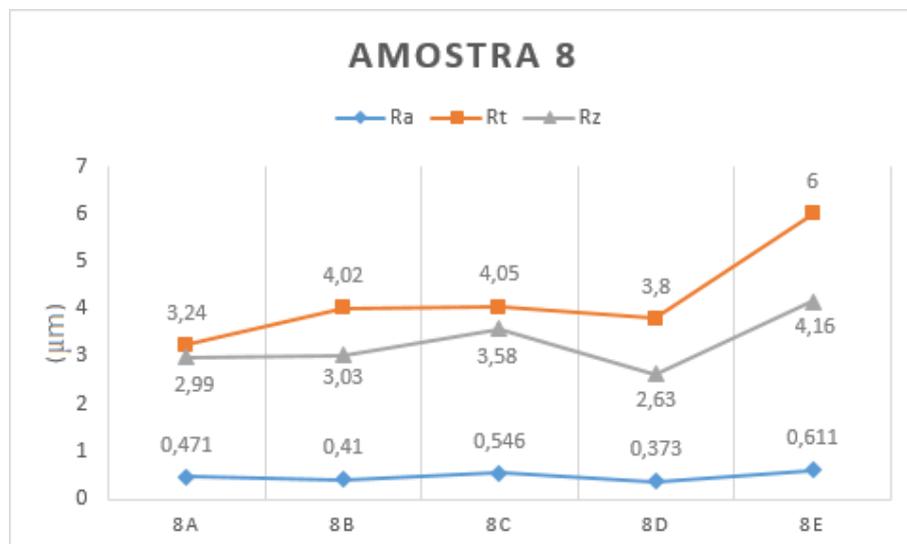
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 22 – Rugosidade da amostra 7



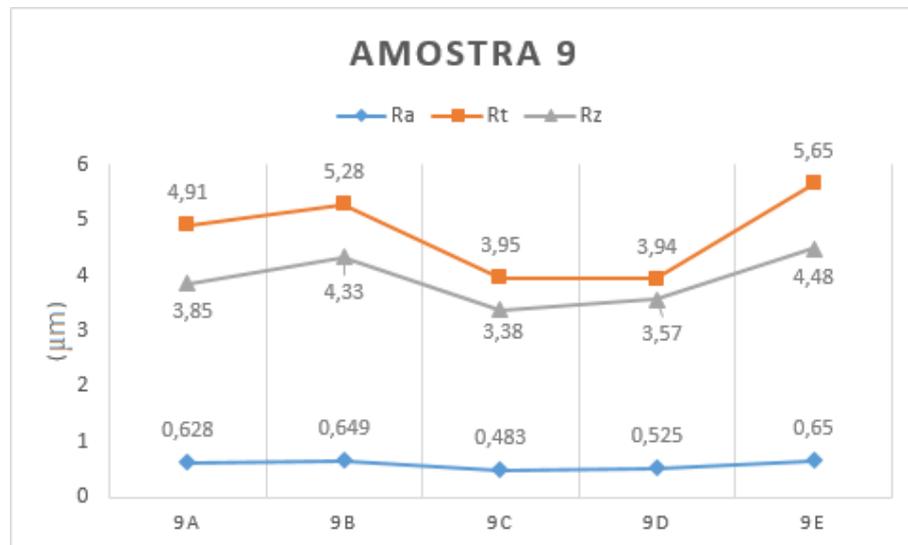
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 23 – Rugosidade da amostra 8



Fonte: AUTOR, 2015.

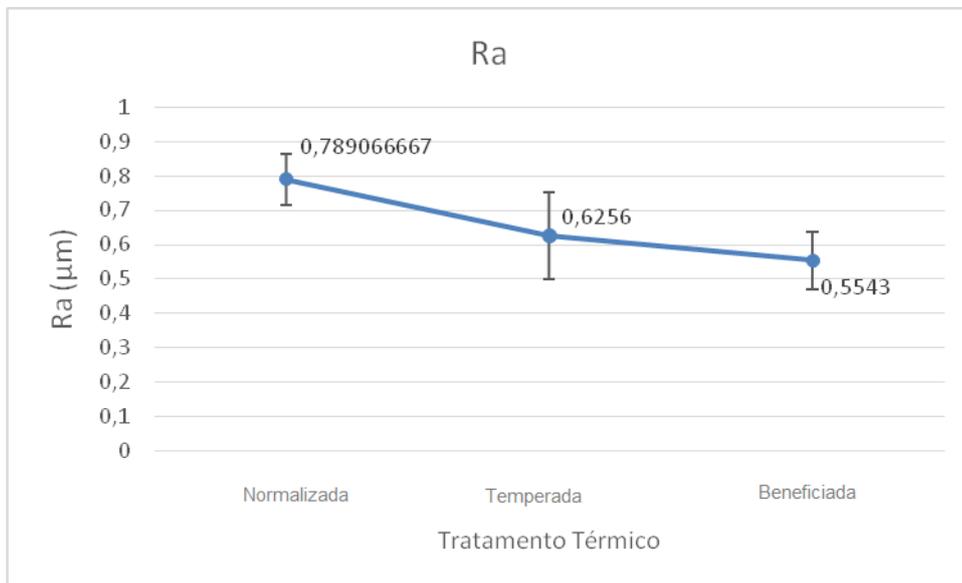
Figura 24 – Rugosidade da amostra 9



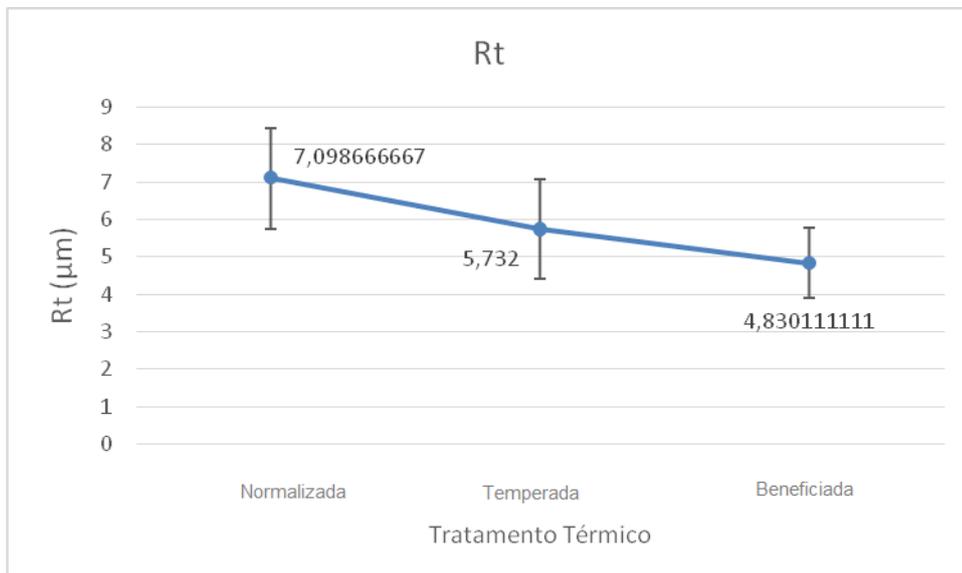
Fonte: AUTOR, 2015.

Os valores médios dos parâmetros Ra, Rt e Rz, de cada amostra e seu desvio-padrão foram calculados e em seguida calculado as médias dos mesmos parâmetros para as amostras de acordo com o tratamento térmico a que foram submetidas.

As figuras 25, 26 e 27 mostram, através de gráficos, as médias dos parâmetros de rugosidade Ra, Rt e Rz diferenciando-as pelo tratamento térmico aplicado. Pode-se observar que tanto os parâmetros Ra, quanto Rt e Rz, sofreram alterações conforme o tratamento térmico aplicado. As amostras normalizadas, são as que apresentaram maior média de rugosidade para todos os parâmetros em questão, e as beneficiadas são as que apresentaram menor valor médio de rugosidade para os mesmos parâmetros, porém ao observar o desvio padrão, verifica-se que não houve de fato um padrão seguido pelas amostras, tendo uma mesma amostra apresentado valores difusos de rugosidade, além da diferença entre os maiores valores obtidos e os menores, para um mesmo parâmetro, ser muito pequena.

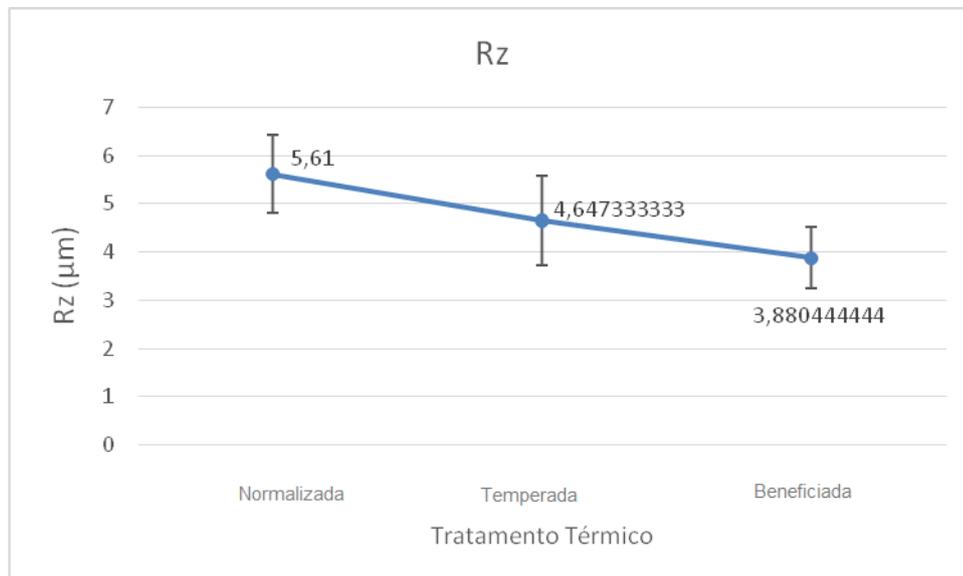
Figura 25 – Parâmetro Ra médio para os diferentes tratamentos térmicos

Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 26 – Parâmetro Rt médio para os diferentes tratamentos térmicos

Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 27 – Parâmetro Rz médio para os diferentes tratamentos térmicos



Fonte: AUTOR, 2015.

Como a dressagem da ferramenta de corte só ocorreu uma vez, e antes do início do processo, pode-se atribuir a maior rugosidade das peças normalizadas, que foram as primeiras a serem retificadas, aos grãos abrasivos do rebolo que estavam mais afiados e agressivos. De acordo com Piratelli (2011), no decorrer da retificação o rebolo tem um desgaste gradual e progressivo, ele vai perdendo seu poder de corte, os gumes ficam cegos e com forma circunferencial, e os poros impregnados de cavaco, justificando assim o fato das amostras temperadas e beneficiadas apresentarem rugosidade menores, mesmo apesar de não muito significativa.

5.2 Dureza

O ensaio de dureza, realizado no laboratório da PUC-Contagem, permitiu a coleta das microdurezas em HV mostradas na tabela 4. As impressões foram realizadas no centro das amostras, e próximo a borda retificada, para cada condição de tratamento térmico. Houve uma certa dificuldade em conseguir impressões precisas próximo a borda retificada, uma vez que o embutimento, realizado a frio, apresentava-se abaulado, além da vibração que o equipamento estava apresentando.

Tabela 4 – Valores de microdureza Vickers encontrados

	Normalizada		Temperada		Beneficiada	
	Centro	Borda	Centro	Borda	Centro	Borda
	282	252	509	310	450	343
	258	252	526	402	451	352
	257	248	561	310	450	362
Média	265,67	250,67	532	340,67	450,33	352,33
Desv. Pad.	14,15	2,31	26,51	53,12	0,58	9,50

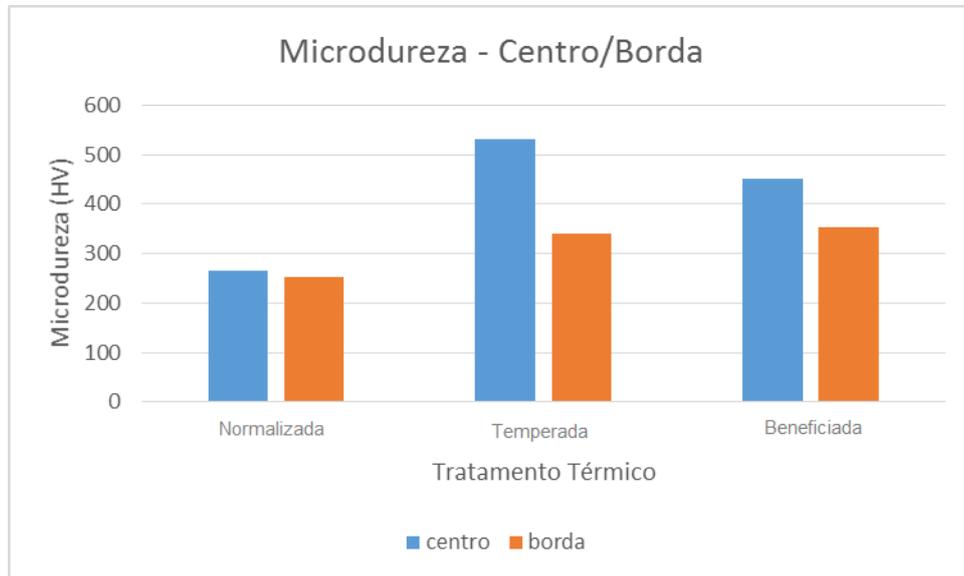
Fonte: AUTOR.

A figura 28 mostra um comparativo das microdurezas encontradas para o centro e para a borda retificada de cada amostra. É visto que, na borda o material apresenta dureza menor que no centro para as três condições de tratamento térmico.

Esse amaciamento da borda é previsto por Colpaert (2008) como sendo consequência de uma provável descarbonetação ocorrida durante os tratamentos térmicos, ou como um possível revenimento ocorrido devido as temperaturas alcançadas no processo de retificação.

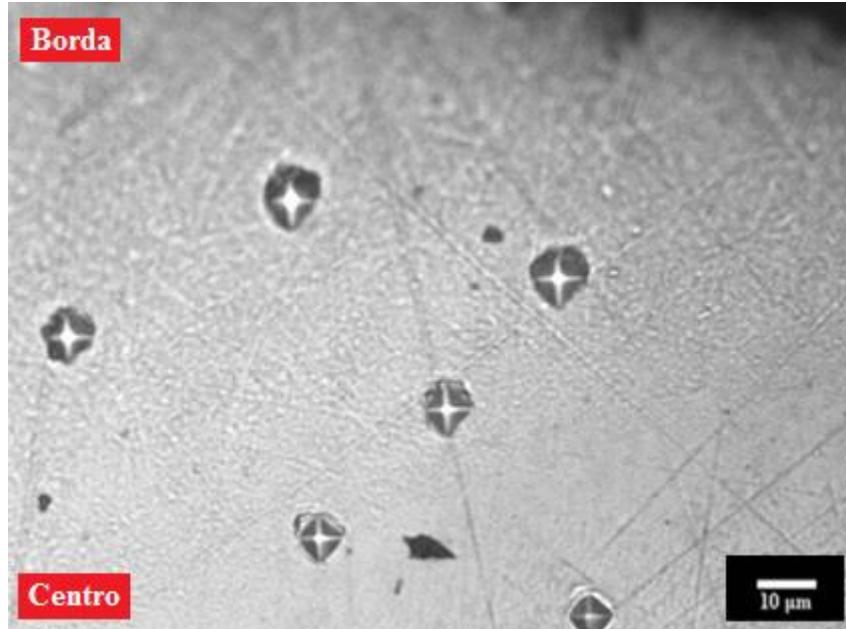
A figura 29 mostra algumas impressões feitas próximo a borda retificada da amostra beneficiada, em que se analisou um perfil de dureza de acordo com o afastamento das impressões, da borda em direção ao centro. Pela variação no tamanho das impressões já é possível perceber que houve alterações, impressões maiores significam que a região está mais macia.

Figura 28 – Gráfico comparativo de dureza



Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 29 – Impressões produzidas pelo ensaio de microdureza na amostra beneficiada, aumento de 400x

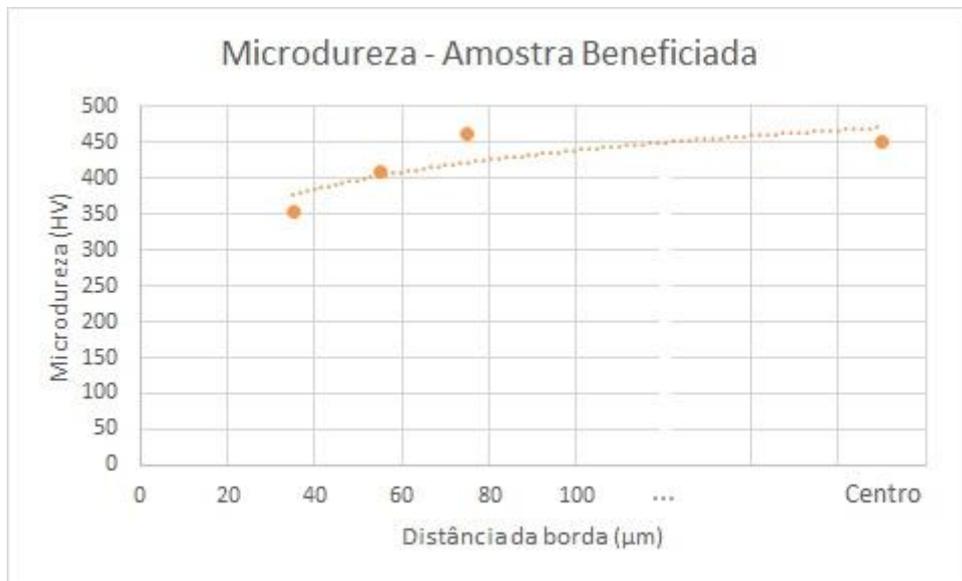


Fonte: AUTOR, 2015.

A variação da dureza obtida no sentido transversal da amostra beneficiada, seguindo-se o raio da mesma, da borda em direção ao centro é mostrado por aproximação na figura 30. Junto as durezas é possível visualizar também uma linha de tendência logarítmica, que foi a que mais se ajustou aos pontos do gráfico, permitindo uma avaliação das previsões de dureza da

amostra em questão. O primeiro nível de impressões, aquelas mais próximas da borda, cerca de 35 μm de distância, apresentou a menor dureza, o segundo nível, cerca de 55 μm de distância da borda, já houve uma certa elevação dessa dureza, e o terceiro nível, cerca de 75 μm de distância da borda, apresentou dureza semelhante ao centro da amostra. Com essa análise, pode-se inferir que a região afetada, ou pela descarbonetação, ou pelo calor gerado pela retificação, ou mesmo por ambos, está compreendida em cerca de 75 μm de profundidade de raio da amostra, de sua superfície em direção ao centro.

Figura 30 – Perfil de Microdureza da amostra beneficiada



Fonte: AUTOR, 2015.

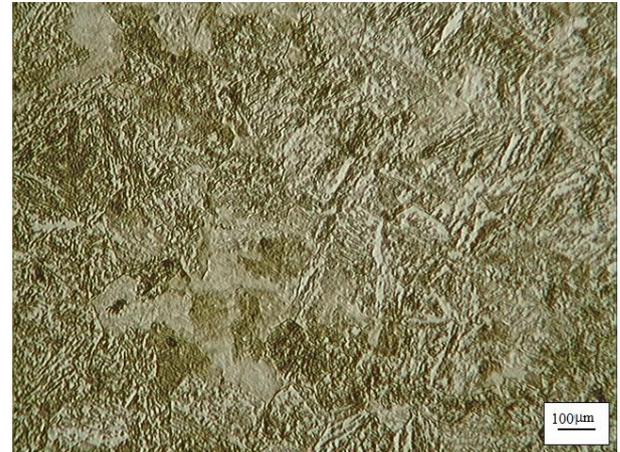
5.3 Metalografia e microscopia ótica

As micrografias obtidas mostraram que os tratamentos térmicos realizados ocorreram de fato, tendo a amostra normalizada apresentado predominância de perlita lamelar em matriz ferrítica, a amostra temperada predominância de martensita, e a beneficiada presença de martensita revenida fina.

Figura 31 – Micrografia do aço AISI 4140 normalizado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes



(a)



(b)

Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 32 – Micrografia do aço AISI 4140 temperado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes



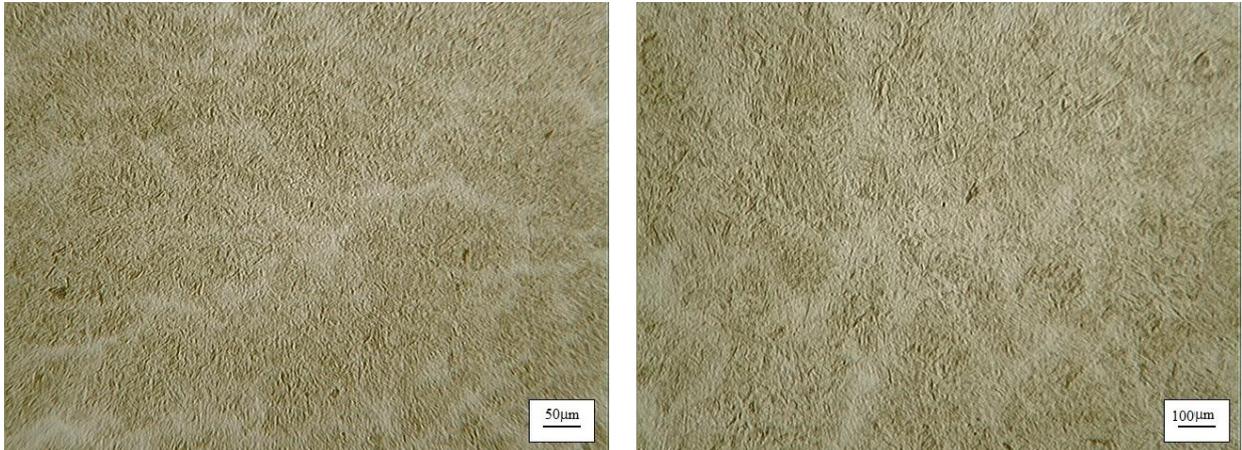
(a)



(b)

Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 33 – Micrografia do aço AISI 4140 beneficiado, ampliado (a) 200 vezes e (b) 400 vezes



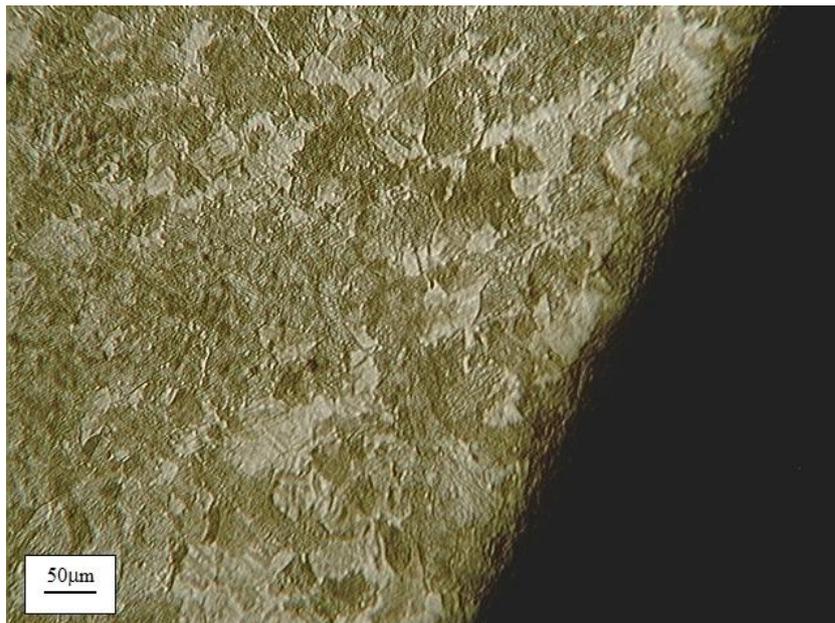
(a)

(b)

Fonte: AUTOR, 2015.

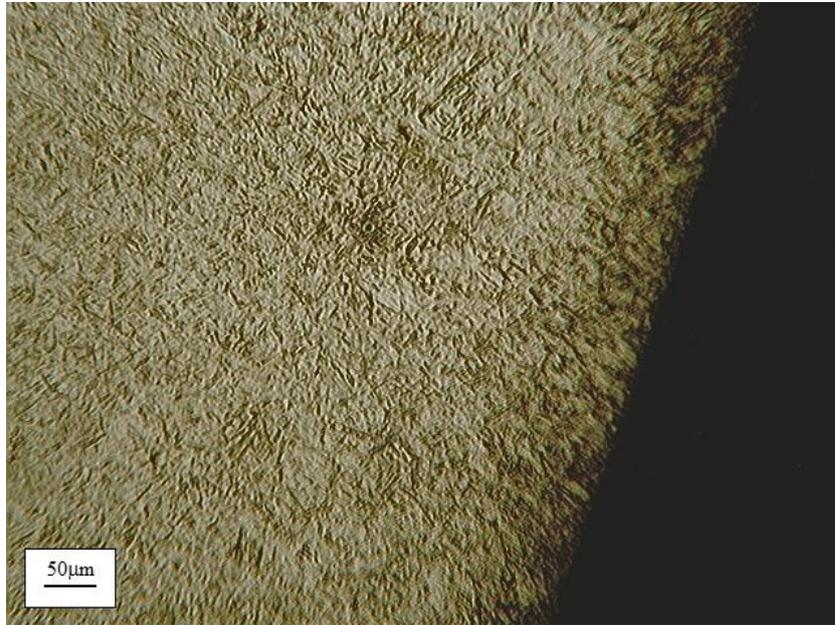
As micrografias obtidas da região transversal à superfície retificada dos corpos-de-prova, em que é possível visualizar a interface aço/resina mostradas nas figuras 34, 35 e 36, ainda que um pouco prejudicadas pelo abaulamento da superfície, não sofreram grandes alterações da borda em relação ao centro, apenas nas amostras temperadas e beneficiadas, é possível perceber uma leve alteração na camada superficial.

Figura 34 – Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 normalizado, ampliada 200 vezes



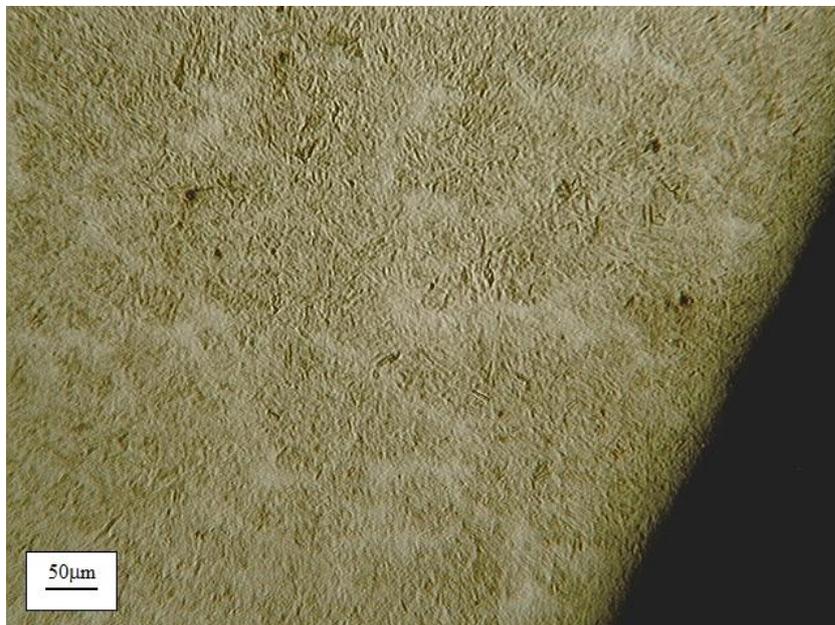
Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 35 – Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 temperado, ampliada 200 vezes



Fonte: AUTOR, 2015.

Figura 36 – Micrografia da borda retificada do aço AISI 4140 beneficiado, ampliada 200 vezes



Fonte: AUTOR, 2015.

Na amostra temperada, figura 35, nota-se que a martensita na região central está mais próxima a forma de agulhas, porém próximo a borda retificada ela está mais semelhante a forma de ripas.

Silva e Mei (2010) afirmam que regiões em que há menor teor de carbono a martensita apresenta-se na forma de ripas, e em regiões com maior teor, em forma de agulhas. Tal percepção leva a crer que houve uma descarbonetação das peças durante o seu tratamento térmico, reduzindo o teor de carbono na superfície das mesmas.

Segundo Minke (2009) quando elevadas temperaturas ocorrem na região de corte durante o processo de retificação e não são muito bem dissipadas, é possível perceber pequenas alterações microestruturais, ou mesmo uma mudança localizada de fase. Isso ocorre pelo fato da temperatura fornecer energia para a difusão, no caso da amostra temperada essa energia fará com que o carbono saia da supersaturação, precipitando-se como carbonetos e diminuindo a dureza local, sendo que, quanto maior a temperatura, mais grossas as partículas de cementita precipitadas (CHIAVERINI, 1987).

Tanto para a amostra temperada, quanto para a amostra beneficiada, figura 36, nota-se que próximo a borda há uma estrutura mais densa, que segundo Colpaert (2008), pode ser justificada por uma temperatura mais elevada na região específica, que faz com que a microestrutura acicular da martensita fique menos definida, se instaurando um revenimento, ou mesmo um revenimento secundário.

Já a amostra normalizada, figura 34, não apresentou alterações microestruturais na borda, possivelmente por dois fatores: o corpo-de-prova já foi adquirido na condição normalizado, não se tendo acesso as variáveis do processo de tratamento térmico aplicadas, leva-se a crer que a atmosfera do forno foi controlada de modo a minimizar a descarbonetação das barras de aço, o outro fator pode estar relacionado a temperatura atingida durante o processo de retificação, que para Colpaert (2008), dependendo da temperatura alcançada não se vê alterações microestruturais, mas ainda assim é possível identificar um decréscimo no valor de dureza. Como a velocidade de mergulho, no processo de retificação, não foi controlada, cada amostra pode ter alcançado faixas distintas de temperatura.

6 CONCLUSÕES

Como resultado da análise da influência da retificação na rugosidade superficial, dureza e microestrutura, o desenvolvimento deste trabalho permitiu averiguar que:

Os valores de rugosidade para os parâmetros Ra, Rt e Rz não foram influenciados pelas condições de tratamento térmico utilizadas. A qualidade da superfície apresentada após o processo de retificação se apresentou bem semelhante para ambas amostras. Isto pode ser justificado pelo fato que geralmente a rugosidade não depende da condição do material e sim de outros fatores, tais como desgaste da ferramenta, profundidade de corte e velocidade de corte.

As análises metalográficas revelaram-se muito importantes somadas as análises de dureza. Na região em que a amostra sofreu alterações no valor de microdureza, houve modificações na sua microestrutura que justificassem tal fato.

Na comparação de dureza foi visto que para todos os casos a borda retificada se mostrou mais macia em comparação com a região central do material.

As alterações que ocorreram na borda do material provavelmente podem ser atribuídas a duas situações principais, a primeira, a decarbonetação ocorrida durante o tratamento térmico, e a segunda, às temperaturas alcançadas com a retificação, provocando um possível revenimento na borda dos corpos-de-prova.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Analisar a região não retificada dos corpos de prova, para averiguar até que ponto as alterações foram provocadas pela retífica ou pelo tratamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASM METALS HANDBOOK. **Classification and Designation of Carbon and Low-Alloy Steels**. Vol 9. Ohio: American Society for Metal – ASM International. 2001.
- ASM METALS HANDBOOK. **Machining Processes**. Vol 16. Ohio: American Society for Metal – ASM International. 1991.
- ASM METALS HANDBOOK. **Metallography and Microstructures**. Vol 9. Ohio: American Society for Metal – ASM International. 2004.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- CATAI, R. E. **Estudo dos métodos otimizados de aplicação de fluidos de corte no processo de retificação**. Revista de Ciência & Tecnologia: Phpg, v. 11, n. 22, 17 mar 2003.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.
- CHIAVERINI, V. **Tratamentos térmicos das ligas ferrosas**. 2 ed. São Paulo. Édile, 1987.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiber Editora Ltda, Campinas, SP, 2 ed, 2000.
- DUFOUR, J. D. **An introduction to metallurgy**. 4 ed. Houston-TX, Cooper Cameron Corporation, 2002.
- KOPAC, J., BAHOR, M. Interaction of the technological history of a workpiece material and the machining parameters on the desired quality of the surface roughness of a product. **Journal of Materials Processing Technology**, v.92-93, 1999.
- KRAFT. Aço Kraft. **Tabela de dureza vickers**. Disponível em: < <http://www.acokraft.com.br/produtos/tabequiv/hrc.html> >. Acesso em: 11 ago 2013.
- KRAUSS, G. **Steel: heat treatment and processing principles**. 6 ed. Ohio: ASM International, 2000.
- LIMA, H. V. Análise do comportamento do fluido de corte recuperado/reformulado no processo de retificação. Belo Horizonte, CEFET-MG, 2013.
- MALKIN, S., CHIU, N. Computer simulation for cylindrical plunge grinding. **Annals of the CIRP**. V.42, p.383-387, jan. 1993.

MARTINS, M. et al. **Análise microestrutural de aços inoxidáveis altamente ligados: da amostragem à interpretação.** UFSCar. São Paulo. 2007.

MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função fabricação.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1992.

MINKE, E. **Contribution to the role of coolants on grinding process and work results.** In: 3rd International Machining & Grinding Conference, October 4-7, Ohio, 1999.

OLIVEIRA, J. M. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2006.

PIRATELLI, A. **Rugosidade Superficial. Terceiro Seminário de Metrologia.** Brasília: UnB: 2011. Faculdades de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2011.

RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle.** Cotia, São Paulo, 1990.

SILLIMAN, J.D. **Cutting and grinding fluids: selection and application.** Michigan, 2 ed, 1992.

SILVA, A. L. V., MEI P. R. **Aços e ligas especiais.** 3 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. **Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXVIII, n 436, maio, 2002, p.140-157.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos.** Fundamentos teóricos e práticos, 5 ed. São Paulo: Blucher, 1982.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II:** brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos. 2ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1995.

TAKAHASHI, D. Nova metodologia para otimizar biocidas em fluido de corte. **Revista Máquinas e Metais**, n.557, jun.2012.

TEDESCO, M. E. **Variação Dimensional e Microestrutural do aço AISI 4140 em peças usinadas por torneamento.** Dissertação de Mestrado em Materiais – Universidade de Caxias do Sul, 2007.

VILLARES METALS. Catálogo Técnico: Composição Química de Aços Villares. 2004. In: CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. Catálogo online: catálogo de produtos. Disponível em: <http://www.villaresmetals.com.br/portuguese/files/FT_40_VL40FO.pdf>. Acesso em: 30 jun 2013.

WANG, P. J. **Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicado em ligas de alto desempenho.** Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

YOUSSEF. A.H; HOFY, H. **Machining technology**: Machine tools and operations, Taylor e Francis group, 2008.