

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

JOSIMAR CARDOSO

**CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE
DENTES RETOS MÓDULO 2 DE AÇO SAE 4320**

JARAGUÁ DO SUL

JUNHO 2019

JOSIMAR CARDOSO

**CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE
DENTES RETOS MÓDULO 2 DE AÇO SAE 4320**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Jean Senise Pimenta, Dr. Eng.

Coorientador: Eduardo Cardoso Castaldo, Me.Eng.

JARAGUÁ DO SUL

JUNHO 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Cardoso, Josimar

CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES
RETOS MÓDULO 2 DE AÇO SAE 4320 / Josimar Cardoso ; orientação
de Jean Senise Pimenta; coorientação de Eduardo
Cardoso Castaldo. - Jaraguá do Sul, SC, 2019.

53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

1. Cimentação sólida. 2. Engrenagens. 3. Aço SAE
4320. I. Pimenta, Jean Senise. II. Castaldo, Eduardo Cardoso.
III. Instituto Federal de Santa Catarina. . IV.
Título.

JOSIMAR CARDOSO

CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS
MÓDULO 2 DE AÇO SAE 4320

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

Jaraguá do Sul, 13 de junho de 2019



Prof. Dr. Jean Senise Pimenta

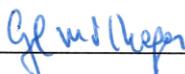
Orientador

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Almir Turazi

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus professores, Jean Senise Pimenta e Eduardo Cardoso Castaldo, pelo companheirismo ao longo da orientação do meu TCC, e também pelos conhecimentos repassados e debatidos durante este período.

Agradeço também aos demais professores do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica, em especial aos professores Gil Magno Portal Chagas, Gerson Ulbricht, José Nunes Santa Maria, Tiago da Silva pelos ensinamentos repassados e discutidos em sala de aula que muito contribuíram para minha formação de qualidade superior.

Aos demais servidores do Campus Jaraguá do Sul – Rau / IFSC, em especial aos técnicos do campus do setor de Apoio Técnico pelo grande auxílio na fabricação das engrenagens no Laboratório de Usinagem, e também ao bolsista do Laboratório de Ensaios e Materiais, Bruno Fertig, que muito me auxiliou na preparação das amostras.

Por fim agradeço a minha família, esposa Liziani e filha Clara por todo apoio e compreensão durante o curso permitindo-me assim concentração e foco ao longo de toda a graduação.

RESUMO

O tratamento termoquímico de cementação sólida é geralmente usado para o endurecimento superficial de engrenagens de aço baixo-carbono. Trata-se de um processo que promove a difusão atômica de carbono, partindo de um meio rico em carbono para o interior de um elemento mecânico. Estudos publicados forneceram informações prévias para aplicação desse tratamento. Com base nisso, Garcia (2017) executou um estudo em engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricados de aço SAE 4320 que comprovou na prática experimental os parâmetros instruídos na fundamentação teórica. As engrenagens tratadas ficaram imersas numa mistura rica em carbono dentro de uma caixa de aço, sendo este conjunto aquecido no forno por um dado período. O aquecimento se deu na fase austenítica do aço, favorecendo a melhor difusão do carbono nesta condição. Em seguida, fez-se a têmpera direta em óleo com a intensão de aumentar a dureza superficial das peças. Na sequência as peças foram revenidas. Este trabalho teve como objetivo principal verificar a reprodutibilidade dos resultados satisfatórios obtidos por Garcia (2017) e aplicar tal procedimento experimental na cementação sólida de engrenagens cilíndricas de dentes retos com maior largura de face dos dentes. Os resultados do presente trabalho também foram satisfatórios para o nível de dureza e a profundidade da camada cementada em engrenagens cilíndricas de módulo 2.

Palavras-Chave: cementação sólida, engrenagens, aço SAE 4320.

ABSTRACT

Thermochemical treatment of pack carburizing is generally used to harden the surface of low carbon steel gears. It is a process that promotes the atomic diffusion of the carbon element from a medium rich in carbon into the interior of a mechanical element. Published studies provided previous information for the application of this treatment. Based on this, Garcia (2017) performed a study on spur gears manufactured of SAE 4320 steel which proved in experimental practice the parameters instructed in the theoretical foundation. The treated gears were immersed in a carbon rich mixture inside a steel box and this set was heated in a furnace for a specific period. The heating occurred in the austenitic phase of the steel, favoring the best diffusion of the carbon in this condition. Then, gears were quenched in oil for increasing its surface hardness. After that gears were tempered. The main objective of this study was to verify the reproducibility of the satisfactory results obtained by Garcia (2017) and apply this experimental procedure for pack carburizing of spur gears with greater teeth face width. The results of this present study were also satisfactory for hardness level and carburized layer depth in spur gears with module 2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seção transversal na superfície de uma barra de aço baixo-carbono cementada em caixa após normalização e têmpera (770°C); região carbonetada rica em martensita (à esquerda).....	14
Figura 2. Esquema da região onde a peça carbonetada foi austenitizada para têmpera (ver Fig. 1); a região cementada foi austenitizada, ficando o núcleo da peça na zona intercrítica (adaptado do original).	15
Figura 3. Penetração da cementação sólida em função do tempo; seções transversais.....	16
Figura 4. Macrografia na seção transversal de uma engrenagem cementada; cementação feita nos dentes e na superfície interna. Trincas são visíveis nas raízes dos dentes. Ataque: iodo.	16
Figura 5. Gráfico esquemático da profundidade da camada cementada (adaptado do original)....	17
Figura 6. Micrografia da amostra-1 (cementação por \square 2,4 h a 900°C). Ataque nital 2%; ampliação 200X.	18
Figura 7. Ampliação da região vista na Fig. 6- presença de microestrutura martensítica. Ampliação 400X.	19
Figura 8. Perfil de microdureza na amostra-1 (cementação por \cong 2,4 h a 900°C).....	19
Figura 9. Parte do diagrama Fe-Fe ₃ C indicando o valor aproximado da solubilidade sólida máxima de carbono na austenita para alguns aços AISI.	22
Figura 10. Dimensionamento do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, onde as variáveis indicadas são: P- força tangencial exercida no dente; H- altura do dente; b- largura do dente; h- espessura do dente na raiz.	24
Figura 11. Ilustração de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos.	25
Figura 12. Esquema do dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos sem correção.	26
Figura 13. Engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste TCC: a) largura da face dos dentes com 12,5 mm; b) largura da face dos dentes com 22,0 mm (escala em milímetros).	30
Figura 14. Esquema para medição dos perfis de microdureza nos dentes das engrenagens.	33
Figura 15. Micrografia do aço SAE 4320 deste trabalho. Presença de grãos de ferrita (fase clara), grãos de perlita (fase escura) e dispersão de carbonetos na matriz. Ataque nital 3%; aumento 200X.	34
Figura 16. Ampliação da micrografia na Fig. 14, havendo carbonetos dispersos na matriz. Aumento 400X.	35
Figura 17. Macrografia da amostra-1 (largura de face do dente = 12,5 mm).....	36
Figura 18. Macrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,5 mm).....	36
Figura 19. Macrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.	37
Figura 20. Macrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.	37
Figura 21. Macrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.	38
Figura 22. Dimensionamento no topo dos dentes das amostras 3, 4 e 5 (largura de face 22,0 mm).	38
Figura 23. Micrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,50 mm). Aumento 200X.....	39
Figura 24. Micrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,50 mm). Aumento 400X.....	40
Figura 25. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 100X.....	40
Figura 26. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X.....	41
Figura 27. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X.....	41
Figura 28. Micrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X.....	42
Figura 29. Micrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X.....	42
Figura 30. Micrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X.....	43
Figura 31. Micrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X.....	44
Figura 32. Perfil de microdureza na amostra-1 (largura de face dos dentes = 12,50 mm).....	45
Figura 33. Perfil de microdureza na amostra-2 (largura de face dos dentes = 12,50 mm).....	45
Figura 34. Perfil de microdureza na amostra-3 (largura de face dos dentes = 22,0 mm).....	46

Figura 35. Perfil de microdureza na amostra-4 (largura de face dos dentes = 22,0 mm).....	47
Figura 36. Perfil de microdureza na amostra-5 (largura de face dos dentes = 22,0 mm). Topo do dente.	48
Figura 37. Perfil de microdureza na amostra-5 (largura de face dos dentes = 22,0 mm). Lateral do dente.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Profundidade da cementação em rodas dentadas.....	17
Tabela 2. Tabulação de alguns dados sobre difusão atômica.....	22
Tabela 3. Relações da largura da face em função do módulo da engrenagem.	24
Tabela 4. Composição química (% peso) da barra de aço SAE 4320, segundo dados do fabricante.	27
Tabela 5. Composição química (% peso) do aço SAE 4320, segundo norma SAE J404-1994.	27
Tabela 6. Propriedades mecânicas do aço SAE 4320.....	27
Tabela 7. Componentes da mistura, registro CAS e composição química (% peso) da mistura usada para cementação sólida, segundo dados do fabricante Wolf. Hacker & Cia Ltda.....	28
Tabela 8. Características físicas do óleo de têmpera.	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1 Tratamentos Térmicos Termoquímicos.....	13
2.1.1 Cementação Sólida	15
2.2 Mecanismo de Difusão Atômica.....	20
2.3 Engrenagens	23
2.3.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Materiais	27
3.2 Métodos	28
3.2.1 Cálculo do Tempo para Difusão do Carbono	30
3.2.2 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico.....	31
3.2.3 Práticas Laboratoriais.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Caracterização do Aço SAE 4320.....	34
4.2 Análise Macrográfica na Região Cementada.....	35
4.3 Análise Metalográfica na Região Cementada	39
4.4 Perfis de Microdureza	44
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE A – Desenho técnico da engrenagem modelo 1	52
APÊNDICE B – Desenho técnico da engrenagem modelo 2	53

1. INTRODUÇÃO

Ao se projetar qualquer equipamento mecânico é de extrema importância uma atenção especial para cada um de seus componentes. A carga que cada um sofrerá e que deverá suportar, bem como os materiais que serão utilizados na fabricação devem ser minuciosamente calculados. Cada elemento tem a sua particularidade em relação às suas propriedades mecânicas e de desempenho no conjunto em que está inserido.

As engrenagens são elementos de ampla aplicação em projetos mecânicos que necessitam de transmissão de torque (força) e/ou velocidade angular. Estas são responsáveis por suportar e transmitir as cargas em sistemas de transmissão, tais como: câmbios de automóveis, caixas de redução de força, motores e máquinas em geral. Existe também uma vasta gama de modelos de engrenagens, a saber: cilíndricas, cônicas, helicoidais entre outras. Por ser um componente que sofre atrito constante com outras peças e entre elas mesmas, a engrenagem precisa de uma atenção especial para que a sua vida útil seja estendida ao máximo. “Um par de engrenagens é um dispositivo de troca de torque por velocidade e vice-versa. Uma aplicação comum das engrenagens reduz a velocidade e aumenta o torque para mover cargas mais pesadas” (NORTON, 2013). Por transmitir força, muitas vezes com cargas altíssimas, ela não pode ter uma dureza muito alta, pois sofreria com trincas e quebras precoces. Também não pode ser dúctil demais, pois haveria deformações plásticas indesejáveis. Uma engrenagem ideal tem, então, características de ductilidade em seu núcleo e maior dureza e resistência ao desgaste em sua superfície. Para atingir esse ponto, é necessário fazer um tratamento térmico e/ou termoquímico nesses componentes. Entre estes tratamentos destacam-se os processos de cementação.

Cementação é um processo termoquímico que tem como objetivo aumentar a concentração de carbono na superfície do elemento mecânico solicitado. Para isso, coloca-se a peça em um ambiente aquecido com alta concentração de carbono, levando a superfície da peça a absorver carbono atômico. Este processo exige a necessidade da realização de uma posterior têmpera seguida de revenimento, a fim de reduzir as tensões internas que foram geradas no interior do componente. Os processos de cementação mais comuns são a sólida, líquida e gasosa. Neste estudo foi escolhido o processo de cementação sólida, tratando-se do modelo mais simples e econômico de realizar a cementação. Entretanto, esse é o processo de maior dificuldade de controlar a profundidade da camada endurecida.

Este trabalho tem por objetivo principal realizar o processo de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de módulo 2 para confirmar os resultados satisfatórios

obtidos na pesquisa realizada por Garcia (2017). Na referida pesquisa, aplicou-se o processo de cementação sólida para diferentes tempos de difusão do carbono para o interior das engrenagens de aço SAE 4320. Os resultados satisfatórios de Garcia (2017) para a dureza e a profundidade da camada endurecida foram obtidos com a cementação sólida pelo tempo de 2,4 h, mantendo-se a profundidade desta camada na faixa de 0,40–0,60mm com níveis de dureza acima de 50 HRC.

Utilizando os resultados aprovados no estudo de Garcia (2017), foram reproduzidas duas engrenagens idênticas e aplicado o mesmo procedimento experimental para verificar a reprodutibilidade dos resultados. Como complemento a tal estudo, foram fabricadas e cementadas outras três engrenagens mais robustas (maior largura de face dos dentes) para verificar se o mesmo processo também alcançaria os resultados desejados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a prática de cementação sólida realizada em engrenagens cilíndricas de dentes retos módulo 2 de aço SAE 4320, verificando a reprodutibilidade dos resultados satisfatórios obtidos por Garcia (2017) e avaliando sua aplicabilidade em engrenagens de mesmo módulo e com diferente largura de face.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a reprodutibilidade dos resultados satisfatórios obtidos por Garcia (2017) na cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320;
- Verificar a aplicabilidade desta prática em engrenagens cilíndricas de mesmo módulo e com largura de face mecanicamente recomendada sob esforço de flexão;
- Analisar a formação da microestrutura através da camada endurecida nos dentes das engrenagens;
- Executar perfis de microdureza na escala Rockwell C a partir da superfície até o núcleo dos dentes endurecidos;
- Verificar a profundidade da camada endurecida e comparar com o valor adequado da profundidade teórica pré-estabelecida para o modulo da engrenagem.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tratamentos Térmicos Termoquímicos

Neste contexto existem dois diferentes grupos: tratamentos térmicos e os tratamentos termoquímicos. O primeiro grupo se destina a modificar as propriedades mecânicas de toda a seção de peças metálicas; enquanto que os tratamentos termoquímicos induzem mudança na composição química e alteração nas propriedades mecânicas numa fina camada a partir da superfície para o interior da peça.

Tratamentos termoquímicos são utilizados para endurecimento e aumento da resistência ao desgaste na superfície dos aços, mantendo-se o núcleo do material dúctil e tenaz. A aplicação industrial destes tratamentos abrange, dentre outros, o endurecimento superficial de engrenagens, pinos móveis e eixos de comando. A difusão atômica do agente endurecedor é favorecida graças às altas temperaturas e ao tempo de exposição da peça num dado meio rico neste agente que será difundido para o interior do material metálico (CHIAVERINI, 2002).

Alguns dos tipos mais comuns de tratamentos termoquímicos são a cementação, a nitretação e a carbonitretação. Dependendo do procedimento, estes poderão ser realizados em meio sólido, líquido ou gasoso. O meio usado nestes tratamentos influencia na velocidade de difusão do elemento (ou agente) endurecedor, incluindo-se as variáveis de temperatura e o tempo. No caso da cementação sólida, não é possível um controle rigoroso da profundidade da camada endurecida como nas cementações líquida e gasosa.

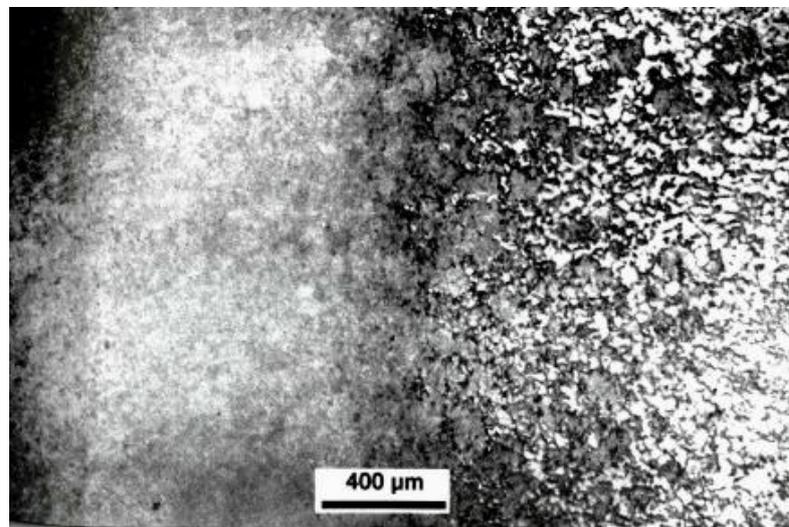
Tratamentos térmicos posteriores à cementação sólida são imprescindíveis, pois a peça cementada passa algumas horas acima da zona crítica, o que pode resultar em crescimento de grão na microestrutura. Conforme Colpaert (2008) indica-se duas opções de tratamentos térmicos que servem para refinar o grão: normalização, seguida de têmpera ou, então, uma dupla têmpera. Para ambos os casos, recomenda-se um revenimento a 180°C para alívio de tensões residuais provenientes da têmpera.

Têmpera é um tratamento térmico que consiste em aquecer uma peça de aço na sua temperatura de austenitização, ou seja, aquecer o material até o campo de fase da austenita. Deve-se manter nessa temperatura por um certo tempo, resfriando-se bruscamente para se obter martensita. Esta microestrutura irá proporcionar aumento na dureza superficial e na resistência ao desgaste da peça (COLPAERT, 2008). Os meios de resfriamento para têmpera variam em severidade, sendo a água, o óleo e a salmoura os mais utilizados. Para se evitar deformações em peças de pequenas dimensões, o óleo é o meio mais recomendado (KOWSER, 2015).

A microestrutura martensítica possui baixa ductilidade e alto nível de tensões residuais na rede cristalina, deixando a peça suscetível à formação de trincas. Faz-se necessário um tratamento térmico de revenimento, posterior à têmpera, para o alívio das tensões residuais. Este tratamento consiste basicamente em aquecer a peça numa temperatura abaixo da zona crítica (diagrama Fe-C do aço), mantendo nesta temperatura por um determinado tempo e resfriando dentro do forno (MEI, 2010).

O tratamento térmico de normalização também requer que a peça de aço seja aquecida na temperatura de austenitização, ou seja, acima da zona crítica. Atingida esta temperatura e, após um dado período, a peça deve ser resfriada ao ar. A normalização serve para homogeneizar a microestrutura de materiais metálicos, sendo no geral aplicado em peças fundidas ou forjadas (CHIAVERINI, 2002). Outra importante aplicação da normalização está no refino do grão austenítico, logo após o tratamento de cementação sólida (COLPAERT, 2008). A Fig. 1 mostra a microestrutura de um aço baixo-carbono, onde aplicou-se uma prévia normalização seguida do tratamento de têmpera para endurecimento superficial da amostra.

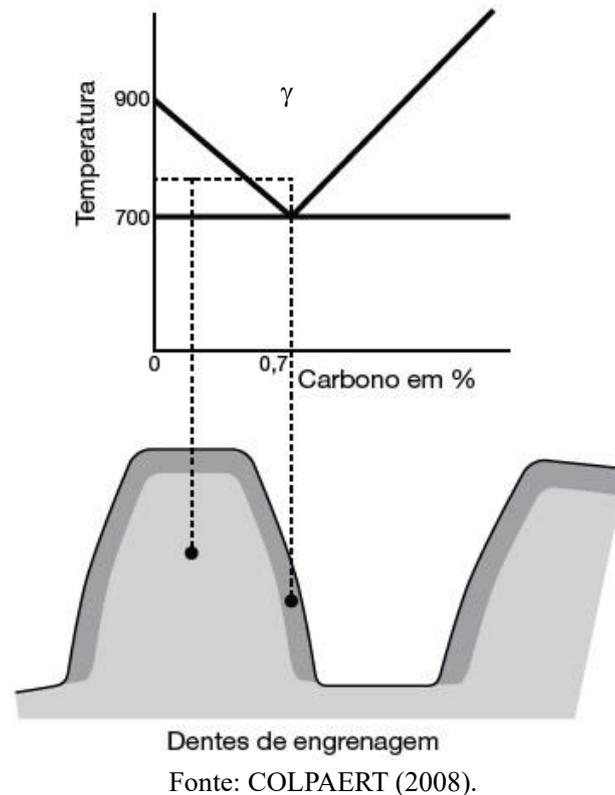
Figura 1. Seção transversal na superfície de uma barra de aço baixo-carbono cementada em caixa após normalização e têmpera (770°C); região carbonetada rica em martensita (à esquerda).



Fonte: COLPAERT, 2008.

“A Figura 2 mostra, esquematicamente, que a temperatura de têmpera foi suficiente para temperar a região cementada, em função do seu elevado teor de carbono, mas não altera muito as propriedades do núcleo da peça, que conserva assim a ductilidade. (...) O tratamento se completa com um revenido a 180°C para o alívio de tensões. Os revenimentos de peças cementadas são, necessariamente, realizados a baixas temperaturas, de modo a ter pouco efeito sobre a dureza da camada cementada.” (COLPAERT, 2008, p. 322).

Figura 2. Esquema da região onde a peça carbonetada foi austenitizada para têmpera (ver Fig. 1); a região cementada foi austenitizada, ficando o núcleo da peça na zona intercrítica (adaptado do original).



2.1.1 Cementação Sólida

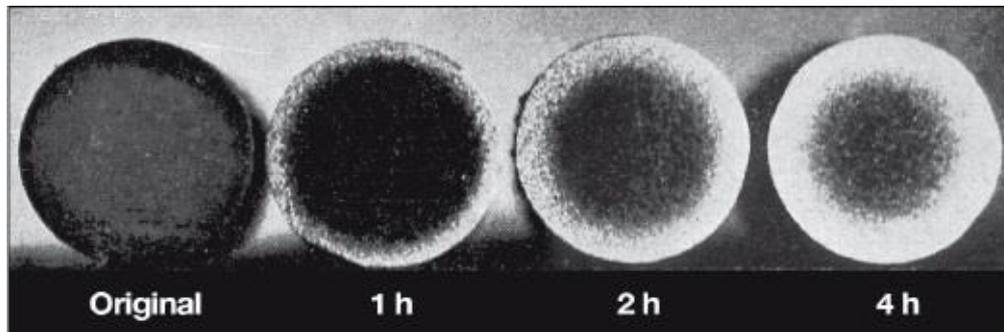
Neste processo as peças a serem cementadas são colocadas em caixas metálicas, devidamente espaçadas entre si e entre as paredes da caixa, sendo este conjunto geralmente aquecido entre 850°C e 950°C. Estas peças de aço devem estar envoltas por uma mistura carburante rica em carbono.

As misturas carburantes mais usadas possuem carvão de madeira, aglomerado com cerca de 5-20% de uma substância ativadora, por meio de óleo comum ou óleo de linhaça com teores de 5-10%. Os ativadores químicos mais comuns são carbonatos alcalinos ou alcalino-ferrosos, tais como os carbonatos de sódio, de potássio e de cálcio; pode-se usar cerca de 20% de coque para aumentar a velocidade de transferência de calor e a obtenção de temperaturas mais uniformes. (CHIAVERINI, 2002)

Na cementação sólida, o oxigênio presente dentro da caixa metálica combina-se com o carbono proveniente da mistura de cementação a elevadas temperaturas, e produz dióxido de carbono que, por sua vez, reage com os átomos de carbono na caixa para produzir monóxido de carbono. Os átomos de carbono provenientes deste monóxido são absorvidos na superfície do aço, enquanto que o dióxido de carbono continua reagindo com carbono e produzindo mais monóxido de carbono (HOSSEINI, 2012).

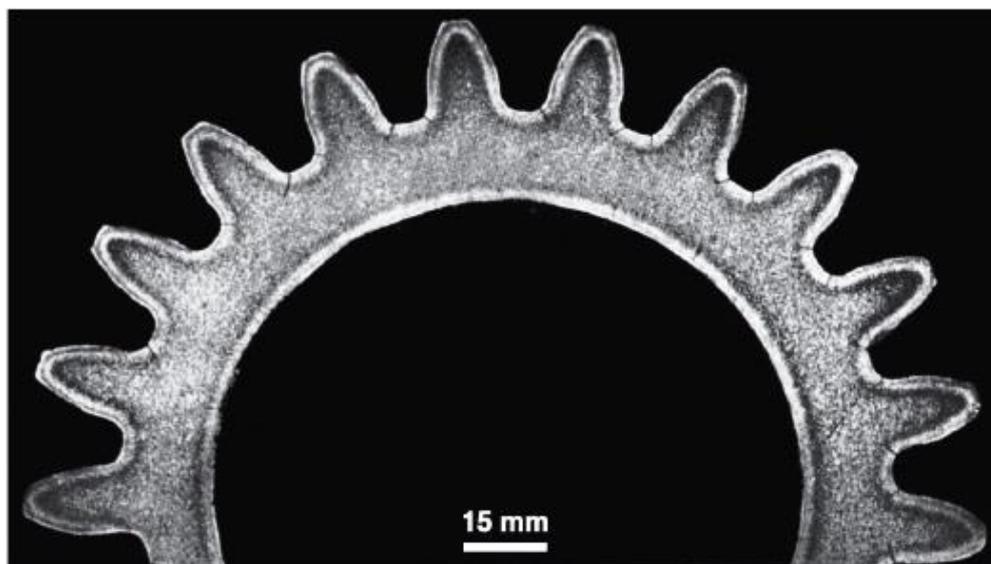
O exame macrográfico é geralmente realizado após o tratamento de cementação, o que possibilita avaliar a homogeneidade e a profundidade de penetração da camada cementada. As Fig. 3 e 4 mostram exemplos desta condição. Na Fig. 3 é analisado o efeito do tempo na espessura da camada cementada; enquanto que na Fig. 4 tem-se a macrografia feita numa engrenagem, onde se avaliou a homogeneidade da camada cementada e também a profundidade da mesma. Esta macrografia revelou a presença de trincas nas raízes dos dentes. Segundo Colpaert (2008), a cementação excessiva é um alto risco na cementação sólida, podendo ocorrer a formação de cementita em rede e causar trincamento na têmpera (ou durante o acabamento superficial).

Figura 3. Penetração da cementação sólida em função do tempo; seções transversais.



Fonte: COLPAERT (2008).

Figura 4. Macrografia na seção transversal de uma engrenagem cementada; cementação feita nos dentes e na superfície interna. Trincas são visíveis nas raízes dos dentes. Ataque: iodo.



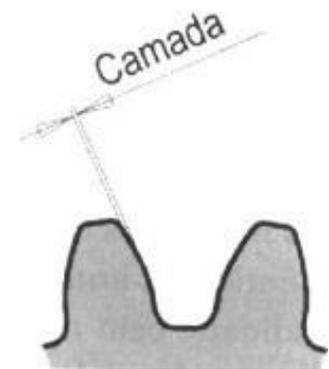
Fonte: COLPAERT (2008).

A Tabela 1 indica algumas profundidades recomendadas para camadas endurecidas formadas por cementação, devido ao tamanho do módulo normal do dente em rodas dentadas; junto à tabela há uma figura com um esquema simplificado da camada endurecida a partir da superfície do dente da engrenagem (GARCIA, 2017).

Hosseini (2012) considera que uma camada endurecida por cementação deve apresentar valores de dureza de no mínimo 50HRC, de acordo com gráfico visto na Fig. 5 onde o referido autor estima a profundidade efetiva desta camada a partir deste valor.

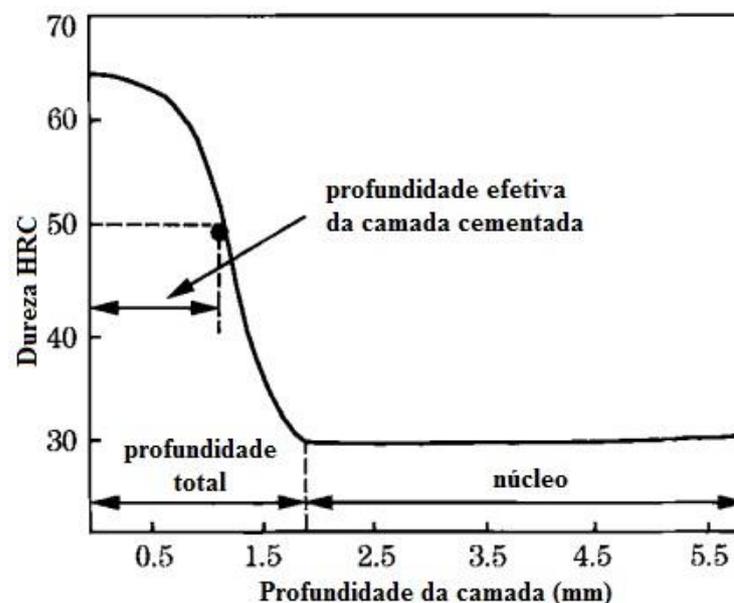
Tabela 1. Profundidade da cementação em rodas dentadas.

Módulo normal		Profundidade (mm)	
≥	<		
	1,00	0,10	0,30
1,00	1,25	0,20	0,40
1,25	1,50	0,25	0,45
1,50	2,00	0,35	0,50
2,00	2,50	0,40	0,60
2,50	3,00	0,60	0,75
3,00	3,50	0,70	0,90
3,50	4,00	0,80	1,00
4,00	4,50	0,90	1,10
4,50	7,00	1,00	1,20
7,00		1,60	1,80



Fonte: MAZZO (2013).

Figura 5. Gráfico esquemático da profundidade da camada cementada (adaptado do original).

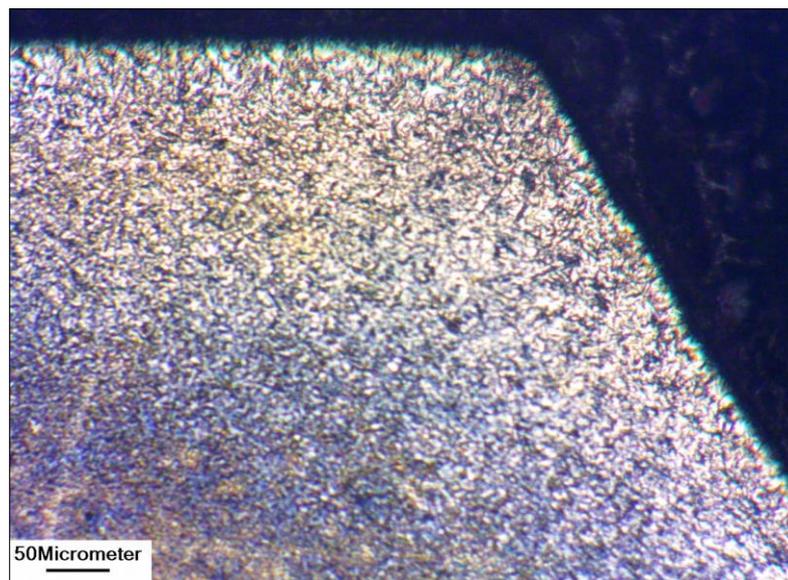


Fonte: Hosseini (2012)

No trabalho de Garcia (2017) experimentos de cementação sólida foram realizados em engrenagens cilíndricas de dentes retos módulo 2 fabricadas de aço SAE 4320. Estudos teóricos baseados na segunda Lei de Fick (regime não estacionário) resultaram em três tempos de difusão do carbono neste aço. Os experimentos produziram resultados satisfatórios para cementação sólida a 900°C por 2,4 h, seguida de têmpera direta em óleo e revenimento. Nesta condição, valores de dureza acima de 50HRC foram obtidos na camada cementada com profundidade dentro da faixa de 0,40-0,60 mm (específica para rodas dentadas de módulo 2).

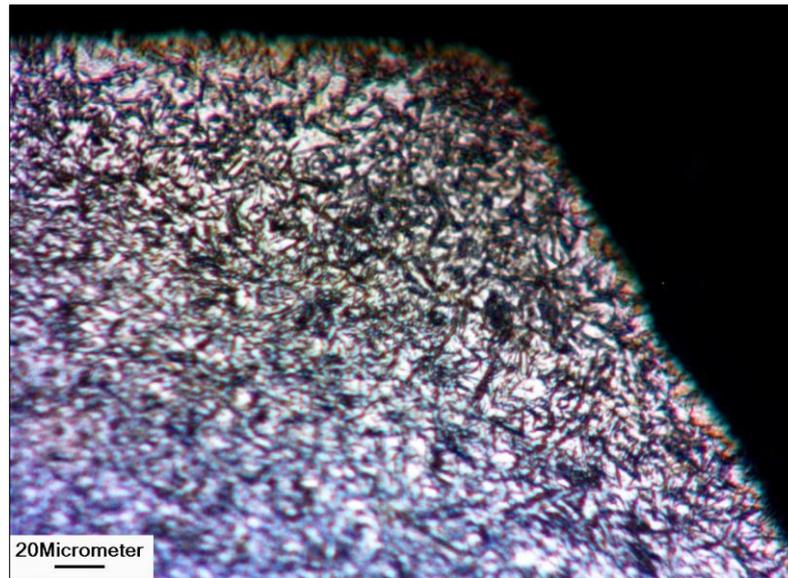
As Figuras 6 e 7 mostram micrografias obtidas de uma mesma região da amostra-1 do trabalho de Garcia (2017), referente ao experimento que gerou resultados satisfatórios. Notou-se que houve formação de uma microestrutura martensítica a partir da superfície para o interior do dente da engrenagem. Tal fato evidenciou que houve suficiente difusão de carbono para que, logo após o tratamento de têmpera, fosse gerada martensita na camada cementada.

Figura 6. Micrografia da amostra-1 (cementação por 2,4 h a 900°C). Ataque nital 2%; ampliação 200X.



Fonte: Garcia (2017).

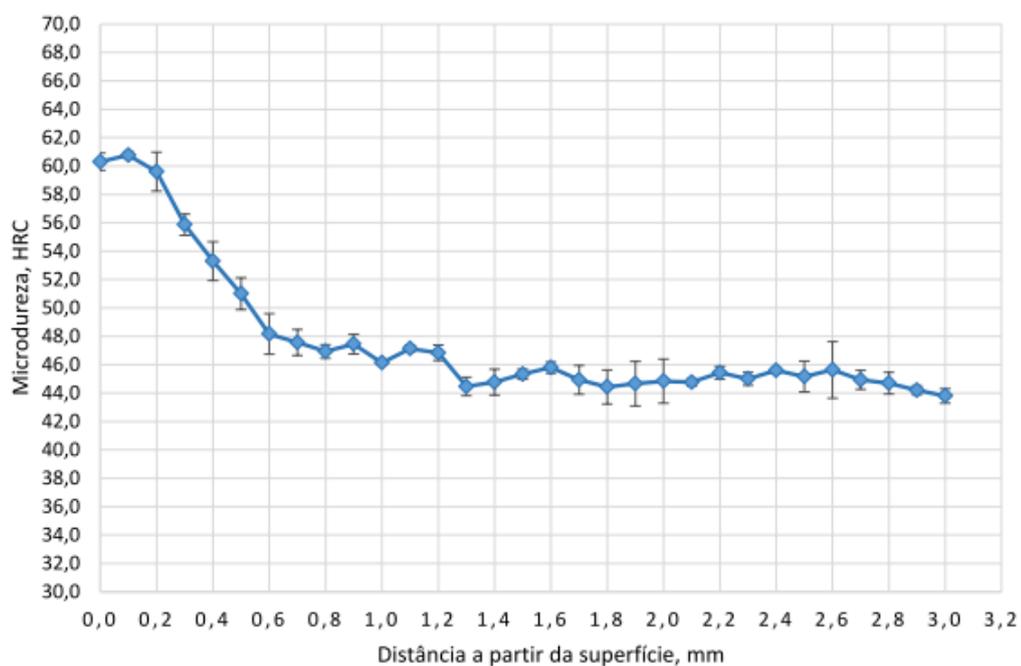
Figura 7. Ampliação da região vista na Fig. 6- presença de microestrutura martensítica. Ampliação 400X.



Fonte: Garcia (2017).

O perfil de dureza mostrado na Fig. 8 também foi obtido da amostra-1 no trabalho de Garcia (2017), no qual a profundidade da camada cementada ficou em torno de 0,5 mm para uma dureza máxima de 60,76 HRC a 0,1 mm a partir da superfície. Logo, a profundidade atingida ficou na faixa de 0,40-0,60 mm específica para a cementação de engrenagens com módulo 2.

Figura 8. Perfil de microdureza na amostra-1 (cementação por $\cong 2,4$ h a 900°C).



Fonte: Garcia (2017)

2.2 Mecanismo de Difusão Atômica

Este mecanismo pode ser caracterizado como um fenômeno de transporte de matéria por movimento atômico, podendo ocorrer tal transferência tanto no interior de um sólido específico quanto a partir de um líquido, um gás ou outra fase sólida (CALLISTER, 2015). Este fenômeno físico é o responsável pela viabilidade de tratamentos termoquímicos, tais como: os processos de cementação (sólida, líquida ou gasosa), e de nitretação, por exemplo.

Os átomos presentes na rede cristalina poderão se movimentar de um lugar para outro dentro desta rede quando atendidas determinadas condições: deve haver uma posição adjacente vazia (presença de lacunas); e os átomos devem ter energia suficiente para aumentar sua frequência vibratória e haver rompimento das ligações atômicas com os átomos vizinhos, causando alguma distorção na rede e facilitando o seu deslocamento (CALLISTER, 2015).

O fluxo difusional (J) pode ser definido como a massa (M) que se difunde através e perpendicularmente a uma seção transversal de área unitária do sólido por unidade de tempo, sendo expressa pela equação 1 (CALLISTER, 2015):

$$J = \frac{M}{A \cdot t} = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (1)$$

onde A indica a área através da qual ocorre a difusão (em $\frac{m^2}{s}$) e t é o tempo de difusão em segundos; as unidades para J são $kg/m^2 \cdot s$ ou $\text{átomos}/m^2 \cdot s$

No regime de difusão não estacionário, que representa grande parte das situações práticas envolvendo difusão atômica, o fluxo difusional e o gradiente de concentração num ponto específico dentro de um sólido variam com o tempo. Nesta condição, a equação matemática recomendada é a segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2)$$

A segunda lei de Fick pode ser resolvida na prática se consideradas algumas hipóteses antes do início da difusão atômica (CALLISTER, 2015):

- todos os átomos do soluto em difusão que estiverem no sólido estão distribuídos de modo uniforme com uma concentração C_0 ;
- valor da posição x é igual a zero na superfície e aumenta em direção ao centro do sólido,
- o tempo zero é considerado como instante imediatamente antes do início da difusão.

O material sólido em questão é considerado semi-infinito, ou seja, durante todo o processo de difusão os átomos não chegam até a extremidade do sólido. E baseado nas hipóteses acima, as condições de contorno podem ser representadas como segue (CALLISTER, 2015):

– para $t = 0$, $C = C_0$ em $0 \leq x \leq \infty$

– para $t > 0$, $C = C_s$ (concentração constante na superfície do sólido) em $x = 0$

$C = C_0$ em $x = \infty$

A aplicação destas condições de contorno resulta na solução para a segunda lei de Fick como visto na equação (3) (CALLISTER, 2015):

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3)$$

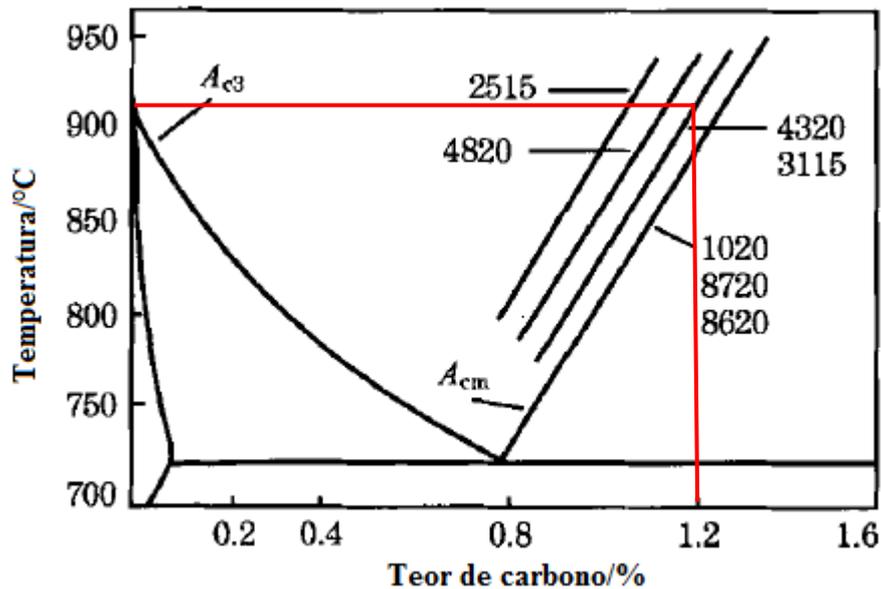
onde C_x indica a concentração numa profundidade x (em metros) após um tempo t (em segundos); C_0 é a concentração inicial dos átomos no sólido; e C_s é a concentração constante na superfície do sólido, ou seja, é a solubilidade máxima de carbono na fase austenita do aço. Essa solubilidade depende da temperatura à qual o aço será submetido e de sua composição química (HOSSEINI, 2012).

No presente trabalho de conclusão de curso será usado o aço SAE 4320 no estudo da difusão do carbono. De acordo com a Fig. 9, no gráfico para o aço SAE 4320 a 900°C obtém-se o teor de aproximadamente 1,2% de carbono (variável C_s) – indicativo da solubilidade máxima de carbono na fase austenita nesta temperatura (ver indicação em vermelho no referido gráfico).

A equação $\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ é a função erro de Gauss e tal função pode ser definida pela equação (4) onde $x/2\sqrt{Dt}$ foi substituída pela variável z :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (4)$$

Figura 9. Parte do diagrama Fe-Fe₃C indicando o valor aproximado da solubilidade sólida máxima de carbono na austenita para alguns aços AISI.



Fonte: Adaptado de Hosseini (2012).

Os parâmetros de concentração presentes na equação (4), definida como solução para segunda lei de Fick, resultarão num perfil de concentrações em função do tempo especificamente como função do parâmetro adimensional $x/2\sqrt{Dt}$ que pode ser determinado em qualquer tempo numa posição definida. Na Tabela 2 são apresentados os coeficientes de difusão (D) para alguns materiais metálicos; a espécie atômica em difusão e a rede dos átomos-hospedeiros influenciam diretamente cada coeficiente de difusão (CALLISTER, 2015). Neste trabalho foi usado o valor de $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para o coeficiente de difusão (900°C).

Tabela 2. Tabulação de alguns dados sobre difusão atômica.

Espécie em Difusão	Metal hospedeiro	Valores calculados	
		T(°C)	D (m ² /s)
Fe	Fe-α (CCC)	500	$3,0 \times 10^{-21}$
		900	$1,8 \times 10^{-15}$
Fe	Fe-γ (CFC)	900	$1,1 \times 10^{-17}$
		1100	$7,8 \times 10^{-16}$
C	Fe-α	500	$2,4 \times 10^{-12}$
		900	$1,7 \times 10^{-10}$
C	Fe-γ	900	$5,9 \times 10^{-12}$
		1100	$5,3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	500	$4,2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	500	$4,0 \times 10^{-18}$

Fonte: CALLISTER, p.113 (2015)

Com relação ao parâmetro C_x (concentração numa profundidade x após um tempo t), pode-se admitir que a concentração de carbono na camada cementada é geralmente controlada entre 0,7 e 1% para percentual em peso (KRAUSS, 1990, apud LAMPMAN, 1991). Contudo, essa concentração no geral não excede 0,9% (WICK, VEILLEUX, 1985, apud LAMPMAN, 1991). Isto porque um teor muito elevado de carbono pode resultar em algum percentual de austenita retida junto da martensita. Chiaverini (2002) sugere que alguma quantidade de austenita retida pode ser benéfica para melhorar a tenacidade da camada endurecida, embora reduza um pouco a dureza superficial.

A aplicabilidade da Lei de Fick possibilitará estimar o tempo de permanência no forno durante o tratamento de cementação sólida, ou seja, o tempo para que ocorra a difusão do carbono para o interior dos dentes das engrenagens na fase austenítica do aço (Fe- γ).

2.3 Engrenagens

Engrenagens são importantes elementos de máquinas utilizados na transmissão de movimento rotativo e torque entre eixos, as quais são basicamente cilindros dentados que devem ser projetados de modo que não haja travamento ou perda de contato entre os dentes. Para que isso ocorra, o par engrenado deve apresentar uma sincronia de movimento que é obtida quando as velocidades angulares entre os pontos de contato da transmissão são iguais.

O termo engrenagem refere-se ao conjunto de pelo menos duas rodas dentadas, sendo que uma é a roda motora e a outra a roda movida, servindo como se fossem um tipo de alavanca. No caso de um mesmo valor de potência, podem ser projetadas de forma que haja um ganho de torque ou de velocidade (MAZZO, 2013).

O elemento engrenagem possui uma história muito longa, até mesmo pré-Bíblica – as primeiras eram fabricadas em madeira e outros materiais considerados fáceis de trabalhar, possuindo dentes como simples pedaços de madeira encrustados em discos e rodas. Mas foi com o advento da Revolução Industrial que as engrenagens passaram a ser fabricadas do modo como conhecemos hoje. (NORTON, 2013)

Ainda conforme Norton (2013), os dentes do par engrenado impedem escorregamento que ocorreria se o par fosse desprovido de dentes, ou seja, apenas cilíndrico. Tal característica torna esse elemento ideal para efetuar transmissão de movimento angular uniforme; outra vantagem está no aumento da capacidade de torque propiciado pelos dentes da engrenagem.

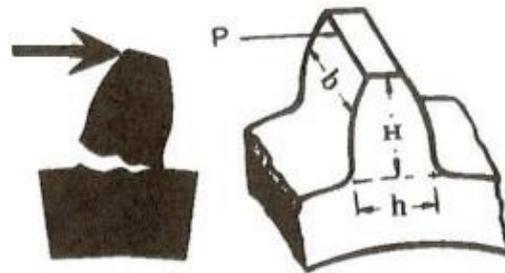
A transmissão de força entre engrenagens montadas num conjunto fornece momentos de torção em eixos para obter movimento e cessão de potência, criando forças que afetam o

movimento de eixos, mancais e demais componentes (BUDYNAS, 2011).

Admite-se que o dente de uma engrenagem trabalha sob esforço de flexão e que, para cálculos específicos segundo a carga atuante neste elemento, este deve ser considerado como um sólido engastado na base que suporta uma dada carga na extremidade da cabeça. Ainda de acordo com Casillas (1981), excluindo estudos mais aprofundados para casos comuns pode-se usar a equação (5) abaixo para o dimensionamento e posterior análise da resistência mecânica da engrenagem – as variáveis b e M indicam a largura e o módulo do dente, respectivamente. Na Fig. 10 tem-se o dimensionamento simplificado do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, que fica submetido em serviço a uma força tangencial P exercida no dente.

$$b = 10.M \quad (5)$$

Figura 10. Dimensionamento do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, onde as variáveis indicadas são: P - força tangencial exercida no dente; H - altura do dente; b - largura do dente; h - espessura do dente na raiz.



Fonte: CASILLAS (1981).

Gieck (1996) sugere uma abordagem mais ampla para as relações de largura do dente de engrenagens cilíndricas com a qualidade de fabricação do próprio dente e do mancal, como pode ser visto na Tabela 3. Posteriormente, esta relação da largura do dente com o seu módulo poderá auxiliar de algum modo na avaliação do nível de resistência mecânica da engrenagem.

Tabela 3. Relações da largura da face em função do módulo da engrenagem.

Qualidade do dente e do mancal	$\frac{b}{m}$
Dentes fundidos ou adequadamente cortados.	6... 10
Dentes usinados; mancais suportados de cada lado por construção de aço ou pinhão livre.	(6)... 10... 15
Dentes bem usinados/ fixação na caixa de engrenagens.	15... 25
Dentes muito bem usinados, boa fixação e lubrificação da caixa de engrenagens.	20... 40

Legenda: b - largura da face; m - módulo da engrenagem.

Fonte: GIECK (1996).

2.3.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos

Conforme Norton (2013), as engrenagens cilíndricas de dentes retos foram projetadas e fabricadas para que seus respectivos eixos operem paralelamente entre si e seus dentes paralelos ao eixo de coordenadas do próprio eixo. A Fig. 11 apresenta este tipo de engrenagem, sendo notada a existência de um canal de chaveta no seu diâmetro interior (usada para travar o eixo à engrenagem) para que a rotação de ambos seja sincronizada, sem perdas de tração ou ocorrência de deslizamentos.

De todos os possíveis tipos, as engrenagens cilíndricas de dentes retos são as mais simples, sendo motivo pelo qual é amplamente usada para desenvolver operações nas relações cinemáticas primárias na forma de dente (BUDYNAS, 2011). Algumas das razões que explicam tal popularidade estão na simplicidade e facilidade associada ao projeto, fabricação, montagem e manutenção das engrenagens de dentes retos (FLORES e GOMES, 2015). Este tipo de engrenagem é capaz de possuir rendimento de até 99% e altas relações de transmissão (8:1), transmitindo assim potências bem elevadas (NIEMANN, 1971, apud FLORES e GOMES, 2015).

Figura 11. Ilustração de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos.



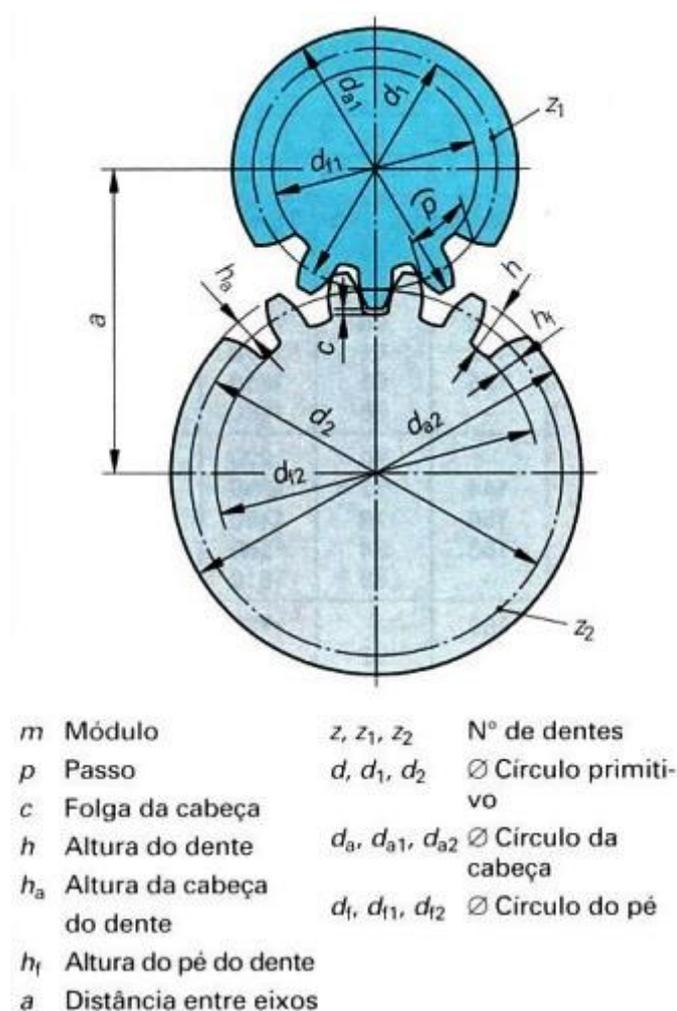
Fonte: www.solucoesindustriais.com.br

A aplicação deste tipo de engrenagem está limitada a velocidades menores a 50 m/s, visto que acima disso há excessivo barulho e vibração (NORTON, 2004). O método mais utilizado na produção de engrenagens é a usinagem, composta basicamente por dois tipos de operação: bruta e de acabamento. O fresamento de forma é um exemplo de operação bruta; e a retificação um exemplo de operação de acabamento, que só é necessária quando o projeto requer alta precisão.

Aço de baixo-carbono é o mais utilizado na fabricação de engrenagens. A razão principal para isso é a sua capacidade de ser tratado termoquimicamente, o que o confere um núcleo de baixa dureza, resistente à flexão, e uma camada superficial de maior dureza e resistência ao desgaste (MAZZO, 2013). O aço SAE 4320 é tipicamente aplicado em componentes da indústria automobilística, incluindo engrenagens de transmissão, coroas e pinhões, por exemplo. As peças cementadas com este aço, dentre outros possíveis, são destinados para aplicações severas, pesadas e de maior responsabilidade em tratores, caminhões, máquinas operatrizes, etc (CHIAVERINI, 2002).

A Figura 12 mostra um desenho esquemático para engrenagens cilíndricas de dentes retos, incluindo importantes parâmetros usados nos cálculos para fabricação das mesmas.

Figura 12. Esquema do dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos sem correção.



Fonte: FISCHER, p.256 (2008)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

A composição química da barra de aço SAE 4320 com diâmetro 50,80 mm usada na fabricação das engrenagens cilíndricas de dentes retos é dada na Tabela 4, segundo dados do fabricante. O aço SAE 4320 é um aço-liga ao cromo, níquel e molibdênio que possui cerca de (% peso): 0,17-0,22%C, 0,40-0,60%Cr, 0,20-0,30%Mo e 1,65-2,00%Ni [*Databook from American Society for Metals*].

Na Tabela 5 é dada a composição química do aço SAE 4320 especificada por norma, que também serve de comparativo com os dados na Tabela 4. Trata-se de um aço muito usado no tratamento de cementação, possuindo alta temperabilidade e alta resistência mecânica, boa soldabilidade e baixa usinabilidade em comparação aos aços-carbono comuns. Algumas propriedades mecânicas do aço SAE 4320 em função de tratamentos térmicos específicos são dadas na Tabela 6.

Tabela 4. Composição química (% peso) da barra de aço SAE 4320, segundo dados do fabricante.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cu	Mo	Cr	Al	Ti
0,190	0,630	0,220	0,023	0,025	1,670	0,160	0,240	0,550	0,027	0,003

Fonte: MKRAFT Aços, Certificado de Qualidade nº 224109.

Tabela 5. Composição química (% peso) do aço SAE 4320, segundo norma SAE J404-1994.

C	Mn	Si	P _{máx.}	S _{máx.}	Ni	Cr	Mo
0,17-0,22	0,45-0,65	0,15-0,35	0,030	0,040	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30

Fonte: Catálogo Manual de Aços Gerdau (2003).

Tabela 6. Propriedades mecânicas do aço SAE 4320.

Condição ou tratamento	Limite de resistência mecânica à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento, em 50 mm (%)	Redução de área (%)	Dureza Brinell (HB)
Normalizado a 895°C	795	460	20,8	51	235
Recozido a 850°C	580	430	29,0	58	163

Fonte: ASTM Metals Handbook 10ed. Vol. 4 – Heat Treating (1991).

Para o tratamento de cementação sólida empregou-se uma caixa metálica fabricada de chapas de aço SAE 1020 com dimensões 100,0 x 100,0 x 170,0 mm e espessura de 3,0 mm. Nesta caixa foram colocadas as engrenagens envoltas na mistura de cementação, devidamente espaçadas por cerca de 20,0 mm entre si e entre as paredes da caixa. Especificações técnicas dos compostos químicos que constituem esta mistura carbonetante são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7. Componentes da mistura, registro CAS e composição química (% peso) da mistura usada para cementação sólida, segundo dados do fabricante Wolf. Hacker & Cia Ltda.

Componentes	Registro CAS	Percentual em peso (% peso)
Carvão vegetal	64365-11-3	40-45%
Sais minerais	7757-79-1	40-35%
Cloreto de sódio	7647-14-5	5-10%
Cianetos	13601-19-9	5-10%

Nota: Códigos CAS são números de registro presentes no banco de dados do *Chemical Abstract Service* - CAS, designados às substâncias, de maneira sequencial, à medida que estas são colocadas nesta base de dados. Desta forma, cada número de registro CAS é um identificador numérico único, que designa apenas uma substância e que não possui significado químico algum. Os números de registro do CAS podem conter mais de nove dígitos, divididos por hifens em três partes, sendo o último dígito o verificador.

Fonte: <http://www.anvisa.gov.br/datavisa/Substancia/CodigoCAS.htm>

O óleo industrial utilizado no tratamento de têmpera foi o South Oil Temp MO 32, fabricado pela Indústria Química Rocha Ltda. Este óleo é recomendado para têmpera convencional de média velocidade ou também a frio, não devendo a temperatura do óleo exceder 70°C. As características físicas deste produto são dadas na Tabela 8.

Tabela 8. Características físicas do óleo de têmpera.

Viscosidades	South Oil Temp MO 32
Densidade	0,875
Viscosidade cSt 40°C	32,9
Viscosidade cSt 100°C	5,2
Ponto de combustão (°C)	205

Fonte: Indústria Química Rocha Ltda.

3.2 Métodos

Nos Apêndices A e B são apresentados desenhos técnicos para o dimensionamento das engrenagens fabricadas neste trabalho. O ângulo de pressão escolhido para este trabalho foi de 20° para uma engrenagem com 20 dentes retos. Este valor de 20° é muito usual na fabricação destes elementos (NORTON, 2013). Partindo-se dos valores fixados para o módulo, o número

de dentes e o ângulo de pressão, outros parâmetros necessários foram calculados para o dimensionamento das engrenagens com base nas fórmulas de Fisher (2008):

Dentes externos:

$$\begin{aligned} \text{Número de dentes:} \quad z &= \frac{d}{m} = \frac{d_a - 2 \cdot m}{m} \\ \text{Diâmetro do círculo da cabeça:} \quad d_a &= d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2) \\ \text{Diâmetro do círculo do pé:} \quad d_f &= d - 2 \cdot (m + c) \\ \text{Distância entre eixos:} \quad a &= \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2} \end{aligned}$$

Dentes externos e internos:

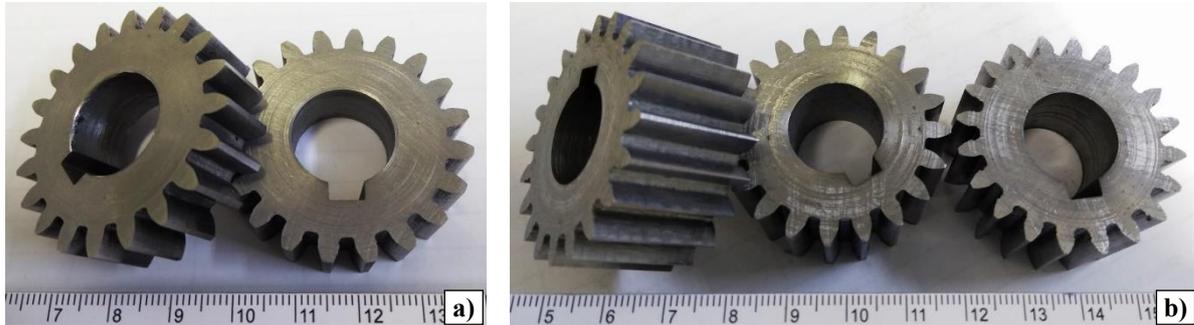
$$\begin{aligned} \text{Módulo:} \quad m &= \frac{p}{\pi} = \frac{d}{z} \\ \text{Passo:} \quad p &= \pi \cdot m \\ \text{Diâmetro do círculo primitivo:} \quad d &= m \cdot z \\ \text{Folga da cabeça:} \quad c &= 0,167 \cdot m \\ \text{Altura da cabeça do dente:} \quad h_a &= m \\ \text{Altura do pé do dente:} \quad h_f &= m + c \\ \text{Altura do dente:} \quad h &= 2 \cdot m + c \end{aligned}$$

As engrenagens cilíndricas de dentes retos foram fabricadas no Laboratório de Usinagem no Campus Jaraguá do Sul – Rau / IFSC. Os procedimentos adotados seguiram a metodologia descrita no trabalho de Garcia (2017, p. 30-31): usinagem no torno convencional de uma barra cilíndrica de aço SAE 1020 para servir de suporte para as engrenagens na fresadora; a barra de aço SAE 4320 foi usinada no torno para o diâmetro externo das engrenagens e blanques foram cortados na espessura das engrenagens projetadas; a barra foi, então, presa ao mandril da fresadora e à este foi fixado o aparelho divisor com um disco de 20 furos (duas voltas completas por vez); foi usada a fresa nº 3 para módulo 2.

O Apêndice 1 deste trabalho mostra o desenho técnico da engrenagem que foi dimensionada no trabalho de Garcia (2017). E no Apêndice 2 é mostrado o desenho para uma engrenagem dimensionada com largura de face dos dentes de 22,0 mm. Segundo Casillas (1981) e Gieck (1996), com tal largura de face tem-se uma engrenagem com resistência mecânica recomendada para esforço de flexão (ver item 2.3 do presente trabalho).

Na Figura 13 são mostradas as engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste trabalho: na Fig. 13a as engrenagens com largura da face dos dentes no valor de 12,5 mm; e na Fig. 13b as engrenagens com largura da face valor de 22,0 mm. Os desenhos técnicos com as respectivas medidas são apresentados nos Apêndices 1 e 2.

Figura 13. Engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste TCC: a) largura da face dos dentes com 12,5 mm; b) largura da face dos dentes com 22,0 mm (escala em milímetros).



Fonte: Autor (2019)

3.2.1 Cálculo do Tempo para Difusão do Carbono

Aqui são mostrados os cálculos para obtenção do tempo para a difusão do carbono na fase austenita do aço, de acordo com segunda Lei de Fick. Os procedimentos adotados seguiram a metodologia do trabalho de Garcia (2017, p. 33-34).

Cabe ressaltar que foi mantido o valor de 0,40 mm para a profundidade estimada da camada endurecida (variável x). Segundo Mazzo (2013), a profundidade da cementação em rodas dentadas com módulo 2 varia de 0,40-0,60 mm (vide tabela 1, p.19). O teor inicial de carbono (variável C_0) e a solubilidade máxima de carbono na austenita para o aço SAE 4320 (variável C_s) foram respectivamente 0,19% e 1,20%C. O coeficiente de difusão usado no cálculo foi de $5,9 \times 10^{-12}$ m²/s na temperatura de 900°C. Abaixo são mostrados as variáveis e os respectivos valores usados na equação da segunda lei de Fick:

- profundidade estimada da camada endurecida (x): $0,40 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$
- teor estimado de carbono para esta profundidade (% peso): $C_x = 0,40\%$
- outras variáveis (em % peso): $C_0 = 0,19\%C$; $C_s = 1,20\%C$; $D = 5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (900°C)

Resolução da segunda Lei de Fick:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$\frac{0,40 - 0,19}{1,2 - 0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \times 10^{-4}}{2\sqrt{(5,9 \times 10^{-12})(t)}}\right)$$

$$0,7920 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,338}{\sqrt{(t)}}\right)$$

z	$\text{erf}(z)$
0,85	0,7707
z	0,7920
0,90	0,7970

Obtenção da variável z , resposta da função $\text{erf}(z)$, aplicando interpolação:

$$\frac{z - 0,85}{0,90 - 0,85} = \frac{0,7920 - 0,7707}{0,7970 - 0,7707}$$

$$z = 0,8898$$

Logo,

$$\frac{82,338}{\sqrt{t}} = 0,8898$$

Resolvendo para t , obtém-se o valor do tempo de forno para a difusão do carbono:

$$t = \left(\frac{82,338}{0,8898} \right)^2 = 8562,8 \text{ s} = 142,713 \text{ min} = \mathbf{2,378 \text{ h}}$$

3.2.2 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico

Inicialmente, utilizaram-se duas engrenagens com largura de face dos dentes no valor de 12,50 mm e estas foram colocadas dentro de uma caixa metálica de aço SAE 1020 (dimensões 100,0x100,0x170,0 mm e espessura 3,0 mm). As engrenagens estavam na posição horizontal dentro de um leito contendo pó de cementação; ambas estavam totalmente envoltas por este pó e igualmente espaçadas com cerca de 20,0 mm entre si e também com relação às paredes (e fundo) da caixa. A caixa não era hermeticamente fechada, sendo apenas tampada com uma tampa do mesmo aço das paredes da caixa.

Colocou-se esta caixa dentro do forno de tratamento térmico, o qual pode atingir até 1200°C (marca Quimios). Todo esse conjunto (caixa e engrenagens) foi aquecido e mantido na temperatura aproximada de 900°C por cerca de 2,4 h. Este tempo possibilitou a difusão atômica do carbono para o interior das engrenagens. Logo após a remoção de cada peça da caixa de cementação, fez-se a têmpera direta em óleo com movimentos suaves para um resfriamento uniforme nas peças. Isto reduz a possibilidade da concentração de bolhas na superfície da peça, o que poderia acarretar a formação de microrregiões com baixa dureza.

Após a devida limpeza das engrenagens, estas foram novamente colocadas dentro do forno para o tratamento de revenimento – prática obrigatória após uma etapa de cementação sólida, seguida de têmpera. Este procedimento foi realizado no mesmo forno do processo de cementação, localizado no Laboratório de Soldagem do campus. As duas peças foram aquecidas na temperatura de aproximadamente 200°C e mantidas por 30 minutos, seguido de resfriamento dentro do forno. Este tratamento visou aliviar as tensões residuais geradas na microestrutura martensítica, formada na camada endurecida superficial em cada engrenagem.

No segundo experimento de cementação, duas engrenagens com largura de face dos dentes no valor de 22,0 mm também foram colocadas na horizontal, ficando igualmente espaçadas de 20,0 mm e envoltas no pó carburante dentro da mesma caixa metálica anterior. Estas engrenagens com maior largura de face dos dentes possuem maior requisito de resistência mecânica em comparação às anteriores. Todo o conjunto foi aquecido e mantido na temperatura de cerca de 900°C por aproximadamente 2,4 h. Houve têmpera direta em óleo, seguindo-se uma etapa de revenimento quando as peças foram aquecidas na temperatura de aproximadamente 200°C por 1 hora. Para o revenimento utilizou-se o forno da marca CienLab, localizado no Laboratório de Ensaio de Materiais do campus.

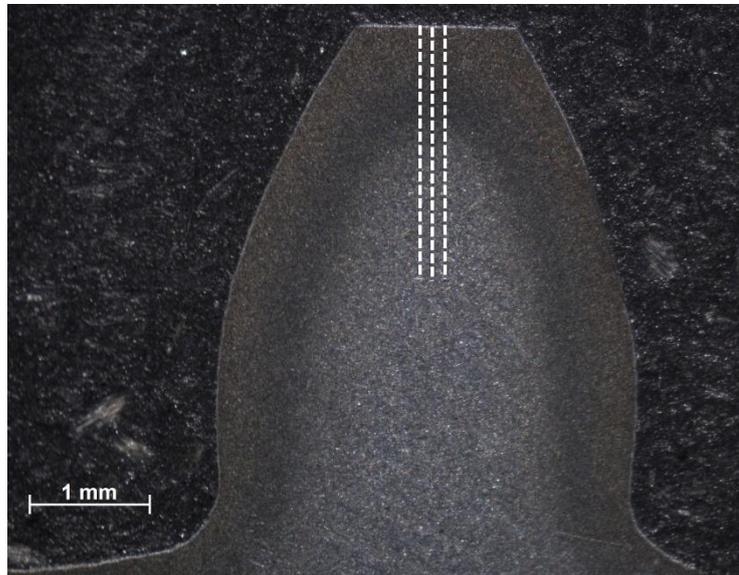
3.2.3 Práticas Laboratoriais

Os experimentos usados para análises de macrografia e metalografia, ensaio de microdureza no Laboratório de Ensaio de Materiais foram basicamente os seguintes:

- corte de material da barra na serra-fita e em máquina policorte;
- corte de amostras dos dentes das engrenagens para macrografia e metalografia (nas peças que foram termicamente tratadas), embutimento a quente com baquelite a 250°C por 20 min com cerca de 125 kgf/cm² na embutidora metalográfica (marca Fortel, modelo 30);
- lixamento das amostras embutidas em lixadeira/politriz utilizando lixas d'água para metais na sequência de granulometria 80, 120, 220, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200;
- polimento em lixadeira/politriz com suspensão de alumina 1,0 µm, e posterior ataque químico com imersão a frio em Nital 3% por 4 a 5 s;
- uso do estereoscópio (marca ZEISS, modelo Stemi 2000-C), sendo geradas fotos com aumento de 6,50X;
- uso do microscópio óptico (marca KOZ-004, modelo XJM404) para análise da microestrutura do material e da camada endurecida;
- uso do microdurômetro (marca Future-Tech Corp., modelo FM-800, serie number XM8158)

- para se traçar perfis de microdureza na escala Rockwell C (HRC) com carregamento de 300 gf por 10 s nas amostras removidas dos dentes das engrenagens cementadas. A Fig. 14 indica os locais das medições dos perfis de microdureza a partir da superfície dos dentes, dos quais foram calculados a média e o desvio-padrão;
- as medições de microdureza foram tomadas a partir da superfície de um dos dentes de cada engrenagem até uma profundidade de 2,0 mm. A distância entre cada indentação foi de 0,10 mm (100 μm), sendo realizadas três medições em cada seção analisada para serem obtidos a média e o desvio-padrão dos resultados.

Figura 14. Esquema para medição dos perfis de microdureza nos dentes das engrenagens.



Fonte: Garcia (2017)

Nota:

Optou-se pela carga de 300 gf (grama-força), pois tal valor proporcionou formar diagonais retas na impressão deixada pelo penetrador; e também por este valor ser limitante na escala de dureza Vickers (escala padrão no microdurômetro, convertido para HRC no equipamento). Cargas menores do que 300 gf poderia gerar recuperação elástica no material metálico testado, dificultando a medida real das diagonais na impressão deixada pelo penetrador piramidal de base quadrada feito de diamante (SOUZA, 1982).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

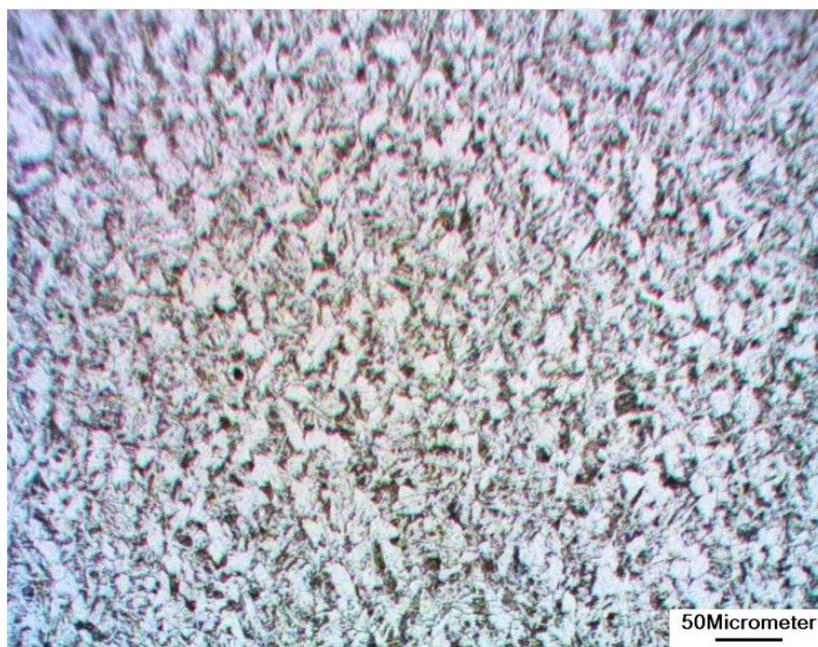
4.1 Caracterização do Aço SAE 4320

Realizou-se no Laboratório de Ensaios do campus o ensaio de dureza na escala Rockwell B (HRB) numa amostra retirada da barra de aço SAE 4320, sendo obtidos os resultados: 92,0; 91,0; 91,0; 90,0; 89,0 e 85,0 HRB. A medida de dureza calculada para este material foi de $89,7 \pm 2,5$ HRB. Apenas para fins de comparação, o valor de 163 HB (dureza Brinell) dado na Tabela 7 corresponde ao equivalente 85 HRB.

Nas Figuras 15 e 16 são dadas micrografias para caracterizar o aço SAE 4320 deste trabalho. Há presença de grãos de ferrita e perlita, e também uma fina distribuição de carbonetos na matriz. Provavelmente houve formação de carbonetos de cromo e molibdênio. Alguns elementos químicos têm elevada afinidade pelo carbono e podem formar carbonetos estáveis no aço, tais como: cromo, vanádio, titânio, nióbio e molibdênio (COLPAERT, 2008).

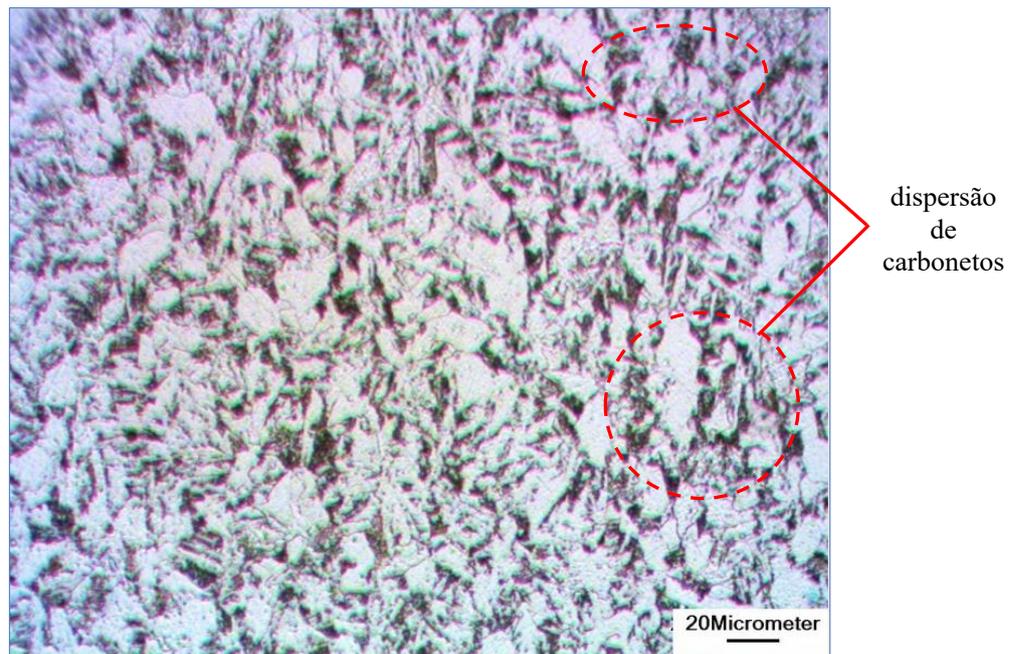
Nas micrografias das Fig. 15 e 16 os grãos de fase ferrita estão com coloração clara e os grão de perlita com coloração escura, devido ao maior teor de carbono nesta última fase. Na perlita, o ataque químico foi mais intenso do que na ferrita. As regiões de contorno de grão são mais facilmente atacadas pelo reagente químico (visualmente aparecendo na cor escura), pois são constituídas por átomos desordenados na rede (MEI, 2010).

Figura 15. Micrografia do aço SAE 4320 deste trabalho. Presença de grãos de ferrita (fase clara), grãos de perlita (fase escura) e dispersão de carbonetos na matriz. Ataque nital 3%; aumento 200X.



Fonte: Autor (2019)

Figura 16. Ampliação da micrografia na Fig. 14, havendo carbonetos dispersos na matriz. Aumento 400X.



Fonte: Autor (2019)

4.2 Análise Macrográfica na Região Cementada

Nesta parte do estudo foi usado o aparelho chamado estereoscópio, sendo analisado os perfis das engrenagens tratadas a partir de macrografias obtidas de cada peça cementada.

As macrografias vistas nas Fig. 17 e 18 se referem às duas engrenagens com largura de face dos dentes igual a 12,5 mm, que foram utilizadas para inicialmente se avaliar a reprodutibilidade dos resultados satisfatórios do trabalho de Garcia (2017) – cementação das peças a 900°C por cerca de 2,4h, seguido de têmpera direta em óleo (e posterior revenimento). Ambas as imagens mostram uma região homogênea e contínua logo abaixo da superfície dos dentes, que foi possivelmente influenciada pelo tratamento de cementação, ou seja, pela difusão do carbono para o interior do aço e posterior têmpera para formação da martensita.

A homogeneidade na profundidade de camadas endurecidas é um fator bastante relevante. Isto porque se esta camada apresenta regiões muito espessas ou estreitas, a vida útil da engrenagem será afetada: a penetração insuficiente de carbono na base do dente pode causar falha prematura; e no caso de uma penetração excessiva na ponta do dente, por exemplo, também poderá fragilizar a peça (DAVIS *et al*, 2005, apud GARCIA, 2017, p. 42).

Figura 17. Macrografia da amostra-1 (largura de face do dente = 12,5 mm).



Fonte: Autor (2019)

Figura 18. Macrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,5 mm).



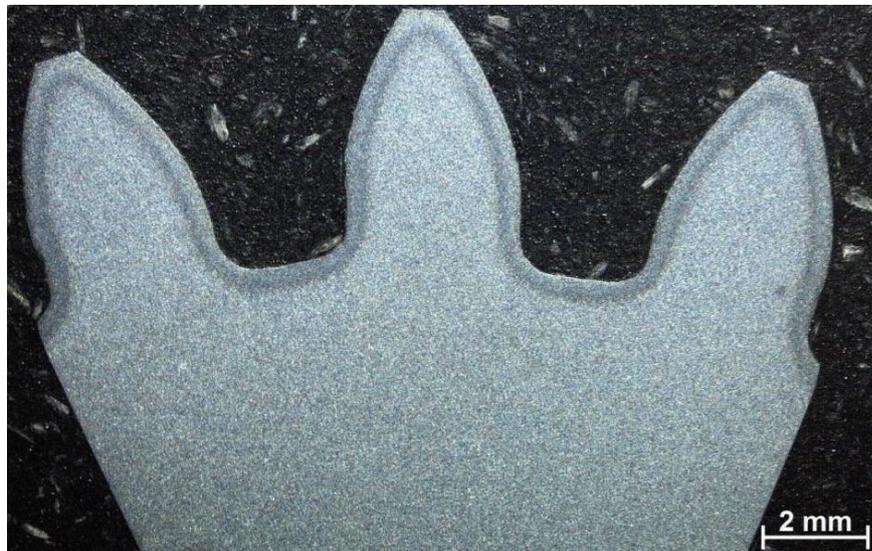
Fonte: Autor (2019)

As Figuras 19, 20 e 21 mostram as macrografias das engrenagens com largura de face dos dentes de 22,0 mm, destinadas para avaliar a reprodutibilidade do procedimento usado para obtenção dos resultados satisfatórios nas engrenagens com 12,5 mm de largura de face. As imagens mostram uma região homogênea e contínua logo abaixo do contorno dos dentes, a qual provavelmente também foi influenciada pelo referido tratamento de cementação sólida.

Na Figura 22 é apresentada uma imagem com três macrografias colocadas lado a lado (e de igual ampliação), sendo uma para cada dente de engrenagem visto nas Fig. 19, 20 e 21. Visualmente notou-se que a dimensão no topo do dente da amostra vista na Fig. 21 era menor do que para as outras duas amostras (imagens nas Fig. 19 e 20). Então, resolveu-se medir esta dimensão no topo do dente das três amostras em questão.

Ficou nítida a dimensão extremamente reduzida no topo do dente da última amostra (ver Fig. 22), sendo praticamente metade da dimensão verificada nas outras duas amostras. Isto evidencia que houve alguma falha no processo de fabricação desta engrenagem ou, então, que alguma ferramenta usada estava danificada ou com intenso desgaste – fato que ocasionou tal defeito no dimensionamento do topo do dente. Salientamos que, tal fato poderá resultar numa maior profundidade da camada cementada a partir do topo dos dentes desta engrenagem. Isto porque as superfícies laterais na porção superior do dente estão muito próximas, daí favorecendo a proximidade das camadas endurecidas (e da difusão do carbono). Tal situação será verificada com a medição do perfil de microdureza nesta amostra.

Figura 19. Macrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.



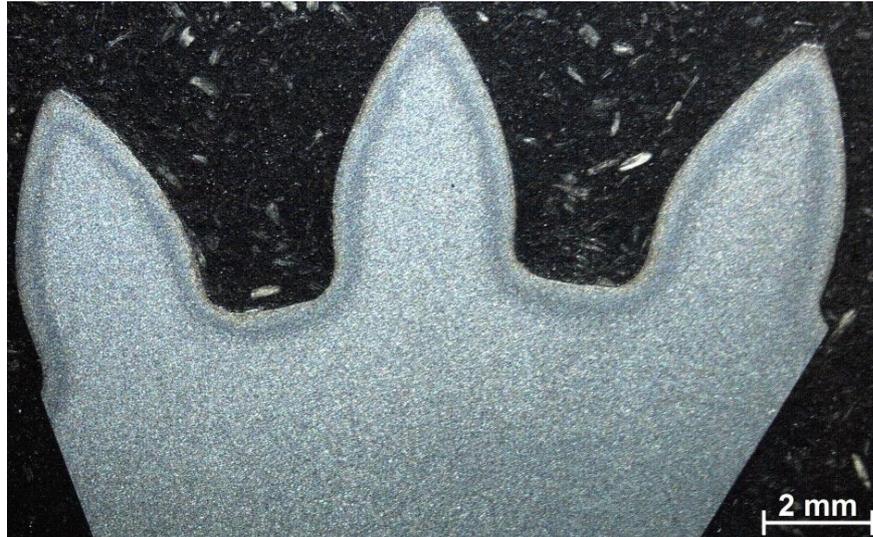
Fonte: Autor (2019)

Figura 20. Macrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.



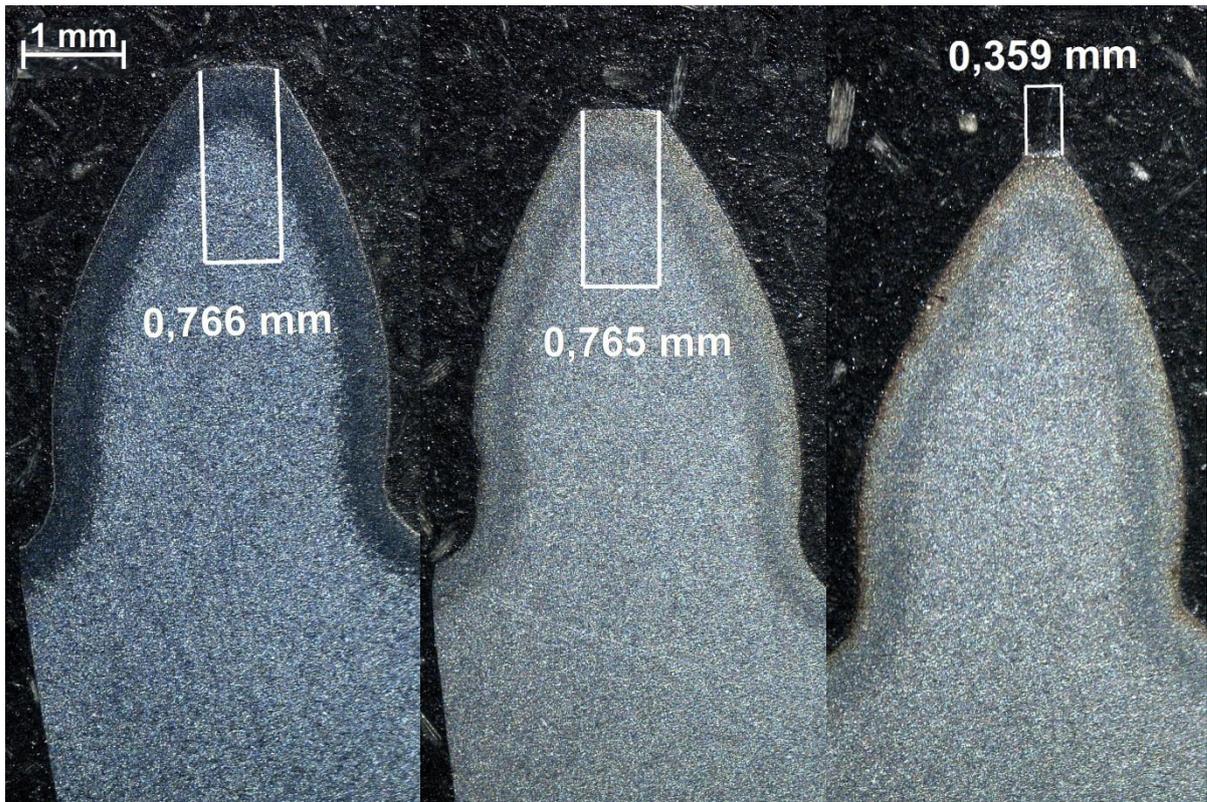
Fonte: Autor (2019)

Figura 21. Macrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,0 mm). Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2019)

Figura 22. Dimensionamento no topo dos dentes das amostras 3, 4 e 5 (largura de face 22,0 mm).



Fonte: Autor (2019)

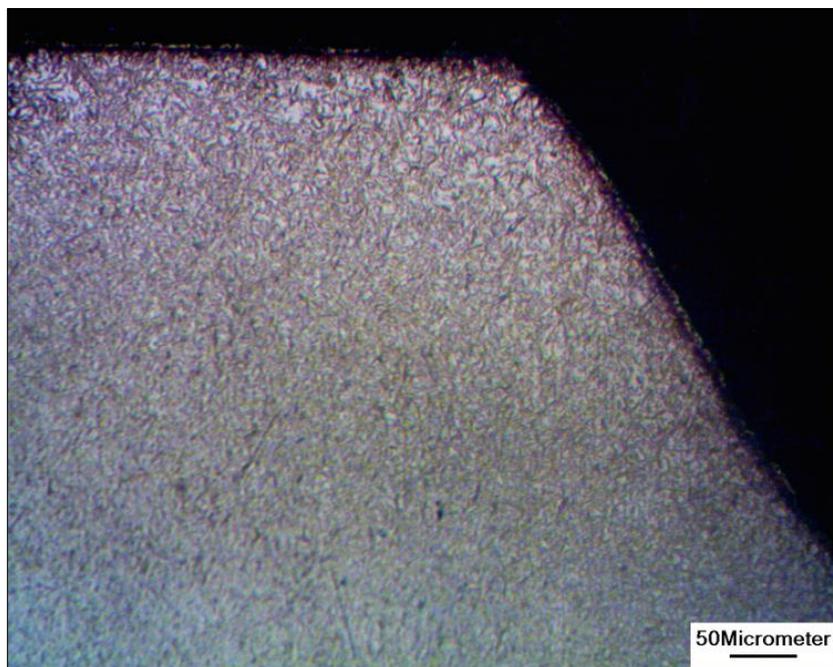
4.3 Análise Metalográfica na Região Cementada

A micrografia mostrada na Fig. 23 exibe o perfil de um dos dentes da amostra-2 para um aumento de 200X. Notou-se que houve evidente formação de microestruturas diferenciadas próximo à superfície e em relação à região no centro do dente. Este fato também foi notado no exame da amostra-1.

Na Figura 24 tem-se uma ampliação da região vista na Fig. 23, porém direcionada próximo à superfície do dente. Houve nítida formação de uma microestrutura tipicamente martensítica na região analisada, ou seja, na região da camada cementada.

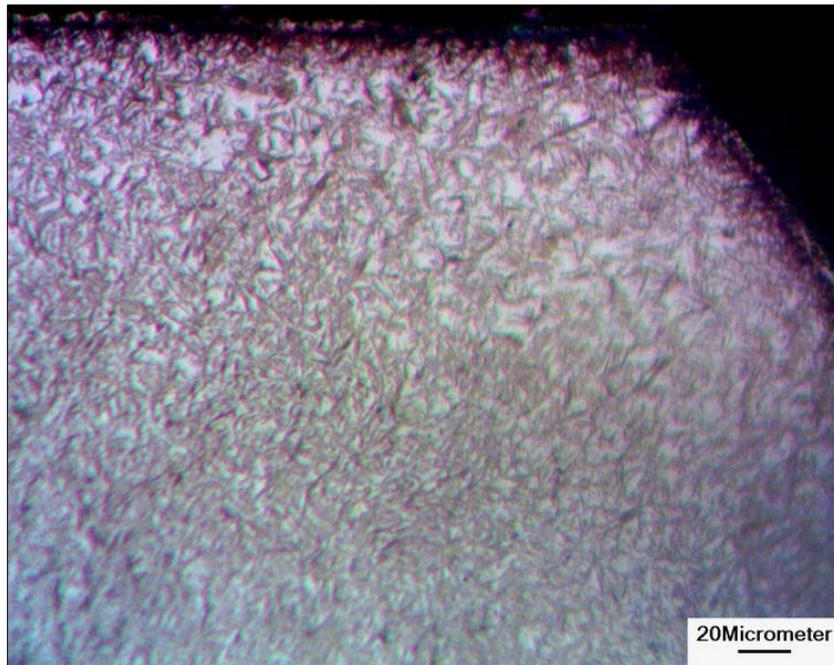
As micrografias vistas nas Fig. 25, 26 e 27 pertencem à amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Igualmente verificou-se a formação de microestruturas diferenciadas a partir da superfície para o centro do dente (ver Fig. 25). Nas Fig. 26 e 27 estão destacadas regiões junto à superfície do dente, onde houve clara formação de microestrutura martensítica. Isto evidencia que ocorreu difusão de carbono para o interior da peça e que após o tratamento de têmpera formou-se martensita.

Figura 23. Micrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,50 mm). Aumento 200X.



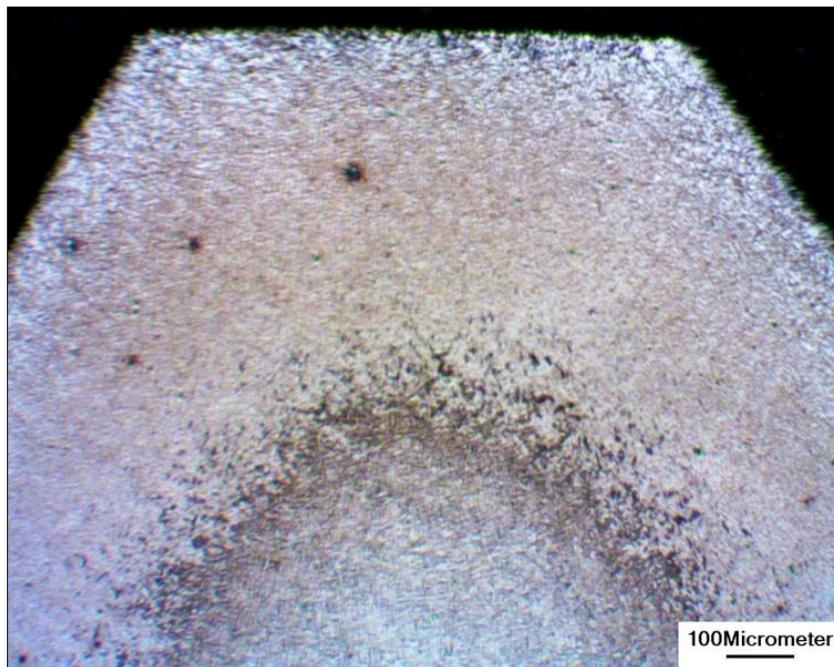
Fonte: Autor (2019)

Figura 24. Micrografia da amostra-2 (largura de face do dente = 12,50 mm). Aumento 400X.



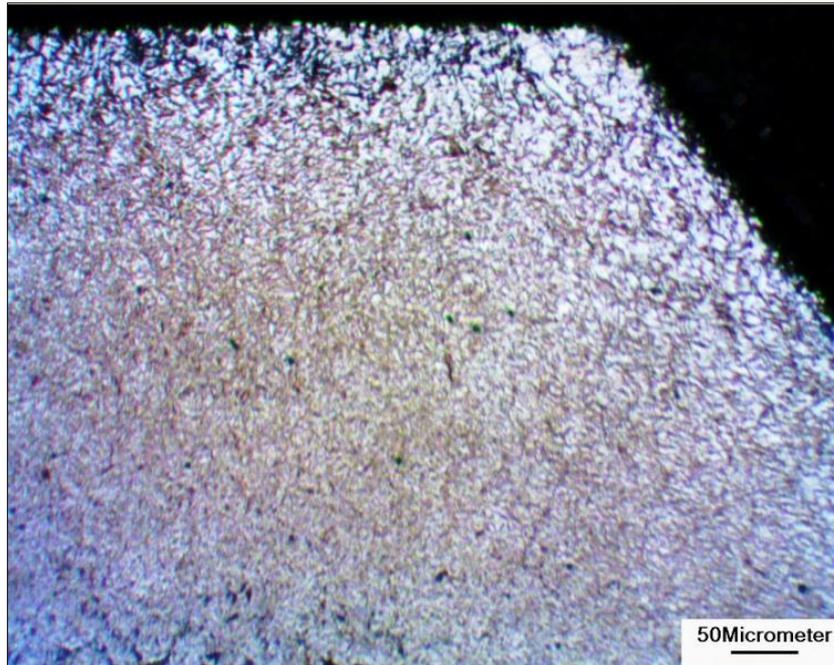
Fonte: Autor (2019)

Figura 25. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 100X.



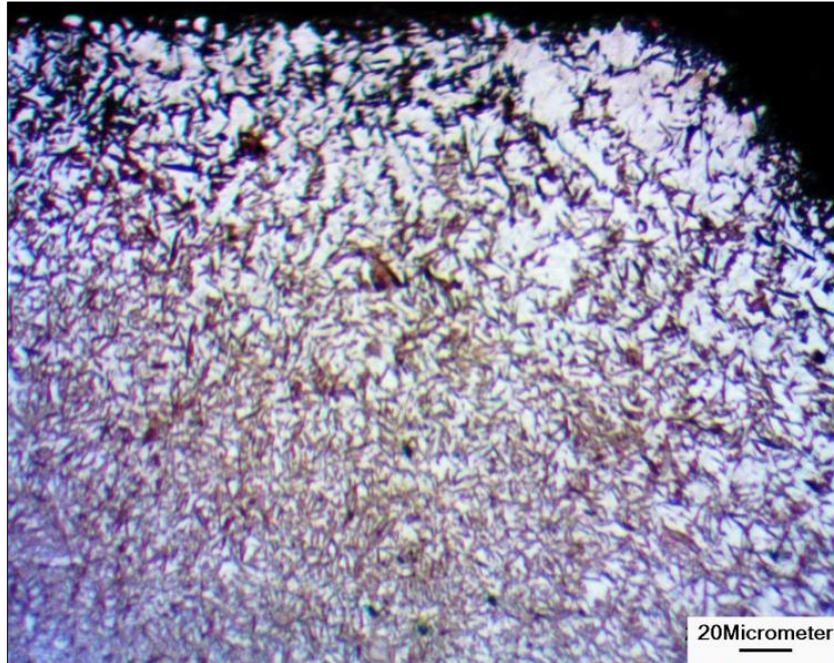
Fonte: Autor (2019)

Figura 26. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X.



Fonte: Autor (2019)

Figura 27. Micrografia da amostra-3 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X.

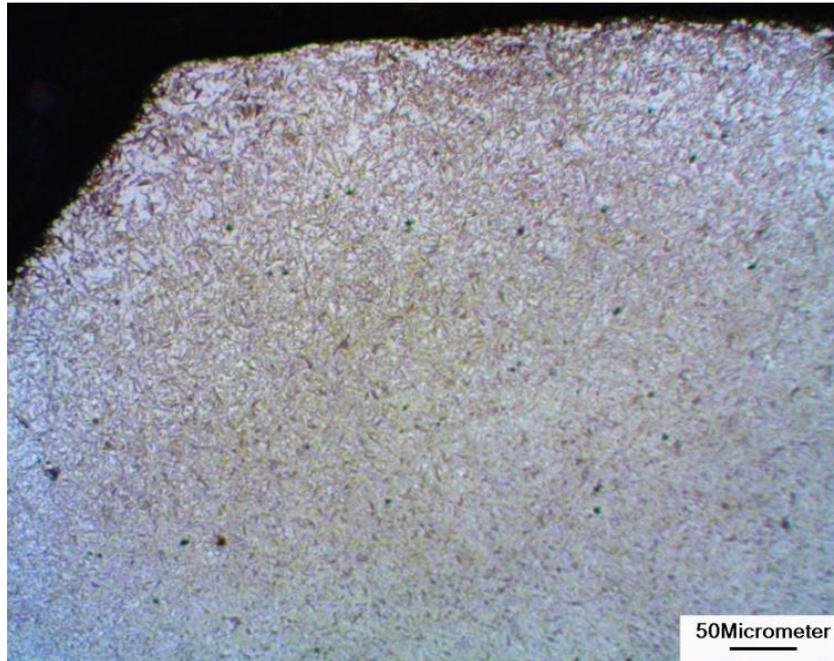


Fonte: Autor (2019)

As Figuras 28 e 29 mostram micrografias para a amostra-4, que possui largura de face do dente de 22,00 mm. Notou-se que houve reprodutibilidade quanto à formação da microestrutura martensítica, comparativamente às amostras anteriores, a partir da superfície

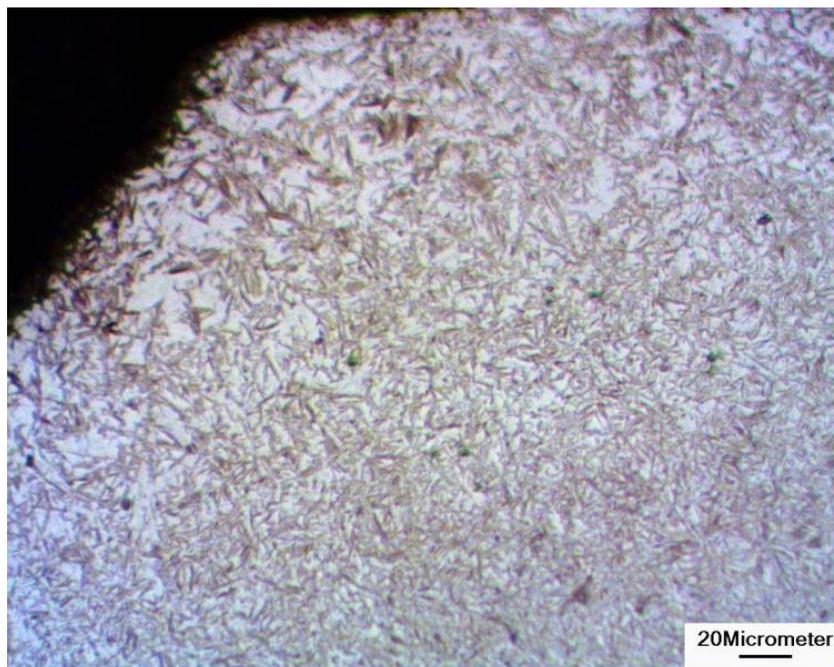
para o centro do dente. Outra vez fica evidente que, o procedimento de cementação sólida aplicado neste trabalho possibilitou uma suficiente difusão de carbono para a formação de uma camada endurecida após o tratamento têmpera.

Figura 28. Micrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X.



Fonte: Autor (2019)

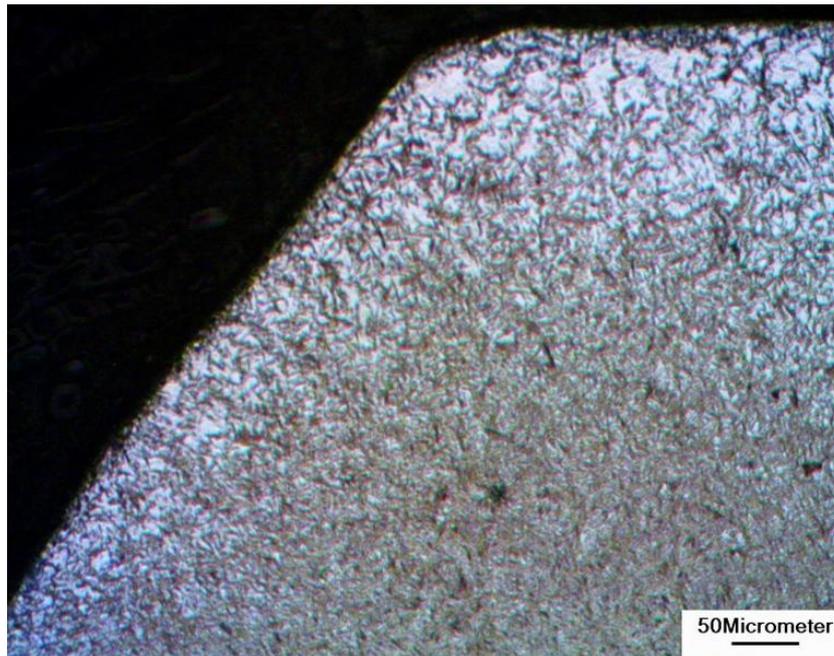
Figura 29. Micrografia da amostra-4 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X.



Fonte: Autor (2019)

As micrografias vistas nas Fig. 30 e 31 se referem à amostra-5. Esta foi a última amostra a ser temperada, logo após a têmpera direta das amostras nº 3 e 4 na mesma lata de óleo (capacidade de 3,6 L), ou seja, o óleo estava devidamente aquecido pelas trocas de calor ocorridas anteriormente. Então, supõe-se que o choque térmico necessário para a têmpera não foi tão intenso quanto na condição das amostras anteriores.

Figura 30. Micrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 200X

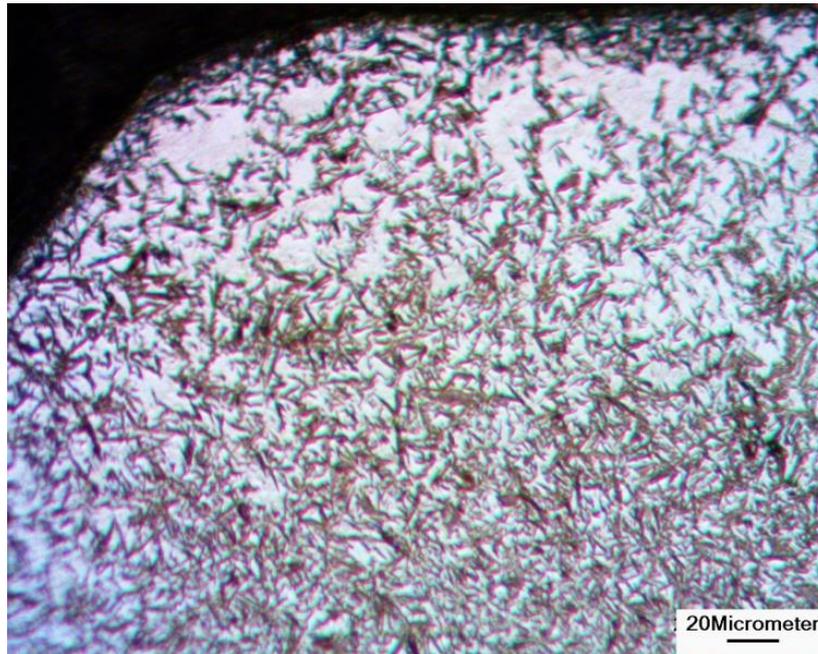


Fonte: Autor (2019)

Na micrografia da Fig. 31 percebe-se que, aparentemente, há maior concentração de regiões claras próximo à superfície em comparação à mesma região vista nas Fig. 27 e 29. Possivelmente tais áreas claras junto à martensita contêm algum percentual de austenita retida na camada cementada. Segundo Chiaverini (2002) existe a tendência de ocorrer retenção de austenita na microestrutura final na execução do processo de têmpera direta em óleo.

A fase constituída de austenita retida envolve as agulhas de martensita e, supostamente, atenua parte das tensões residuais geradas na rede cristalina e aumenta a tenacidade e resistência à fadiga da camada cementada. Contudo, a sua presença (não afetada pelo revenimento) causa uma queda na dureza superficial da peça (CHIAVERINI, 2002).

Figura 31. Micrografia da amostra-5 (largura de face do dente = 22,00 mm). Aumento 400X



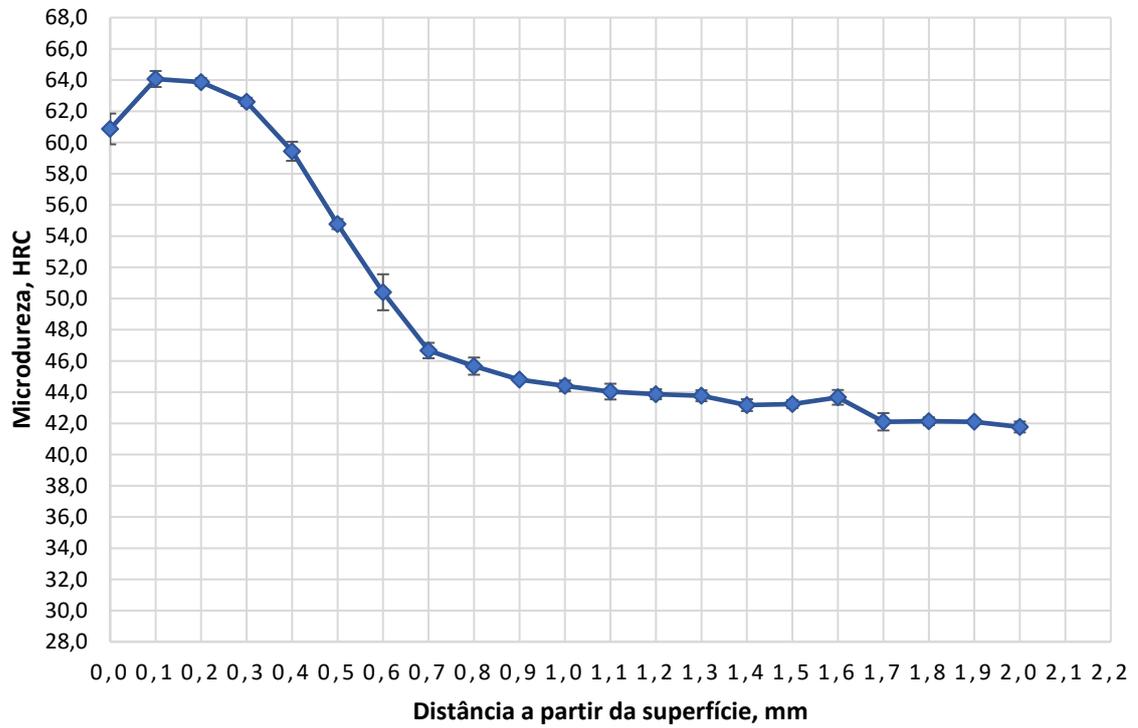
Fonte: Autor (2019)

4.4 Perfis de Microdureza

As Figuras 32 e 33 mostram perfis de microdureza na escala Rockwell C feitos nas amostras 1 e 2 das engrenagens cementadas com largura de face de 12,50 mm. Verificou-se a presença de valores de dureza acima de 50 HRC nas profundidades de cerca de 0,60 mm e 0,65 mm, respectivamente. A dureza máxima obtida na amostra 1 foi 64,5 HRC a 0,1 mm e na amostra 2 foi 60,80 HRC a 0,3 mm, ambos a partir da superfície do dente. Os valores obtidos nestes perfis podem ter sido influenciados pela sequência do tratamento de têmpera, ou seja, primeiro mergulhou-se a amostra 1 no óleo a temperatura ambiente e depois a amostra 2 na mesma lata de 3,6 L.

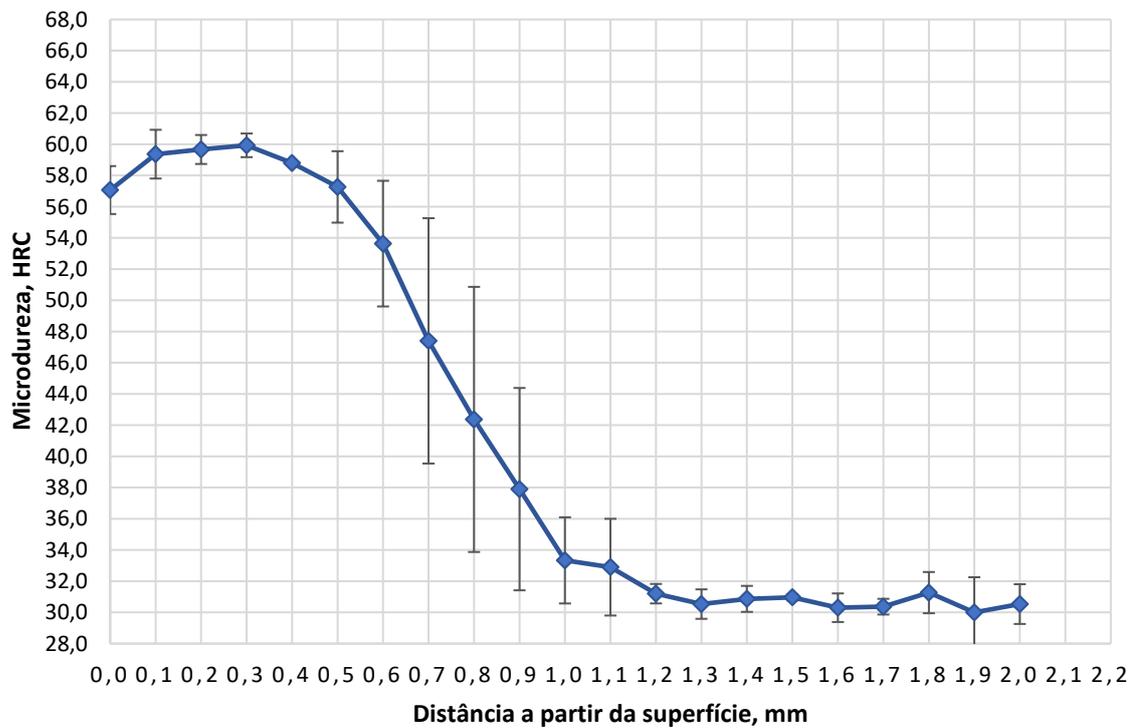
Os cálculos de difusão foram elaborados para obtenção de uma camada cementada com 0,40 mm, sendo que a profundidade recomendada desta camada para engrenagens de módulo 2 está na faixa de 0,40-0,60 mm (vide Tabela 1). Logo, nota-se que o valor de referência para a dureza nesta camada ficou próximo ao limite superior desta faixa. Vale ressaltar que o tempo de revenimento destas amostras foi de cerca de 30 min a 200°C – a metade do tempo usado no revenimento das amostras no trabalho de Garcia (2017).

Figura 32. Perfil de microdureza na amostra-1 (largura de face dos dentes = 12,50 mm).



Fonte: Autor (2019)

Figura 33. Perfil de microdureza na amostra-2 (largura de face dos dentes = 12,50 mm).

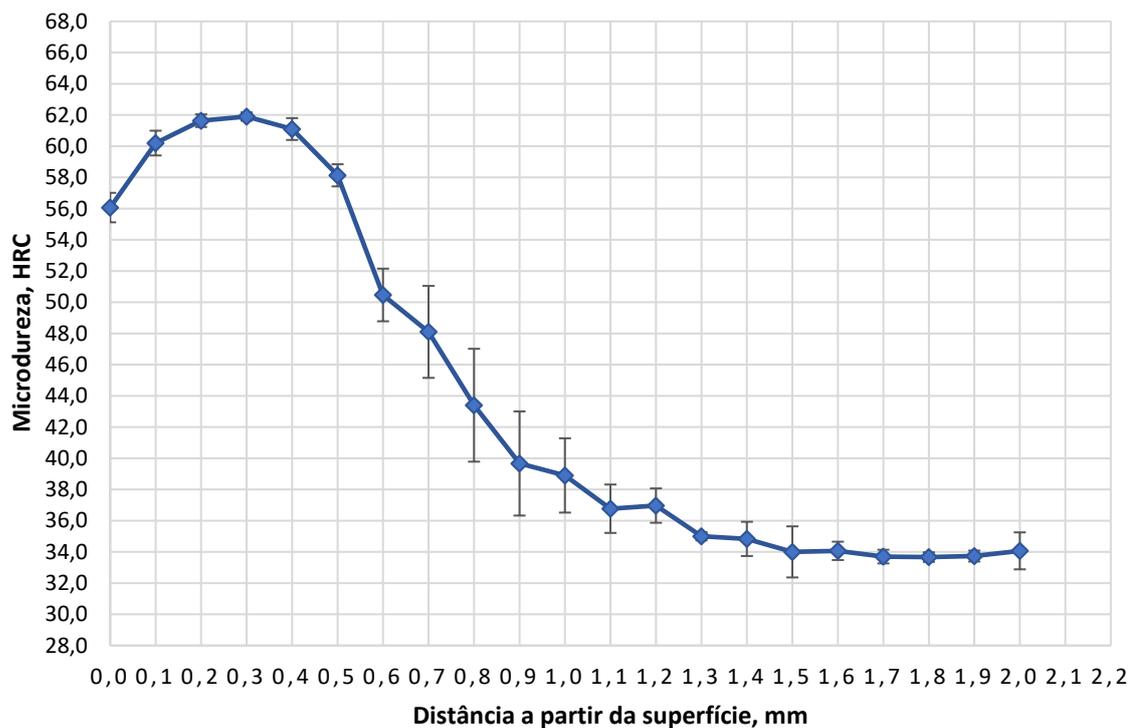


Fonte: Autor (2019)

Nos perfis de microdureza vistos nas Fig. 34 e 35 (engrenagens com largura de face dos dentes igual a 22,0 mm) os valores de dureza acima de 50 HRC foram registrados nas profundidades de cerca de 0,60 mm e 0,55 mm, respectivamente. Igualmente o valor de referência para dureza mínima nesta camada cementada ficou próximo ao limite superior da faixa de 0,40-0,60 mm.

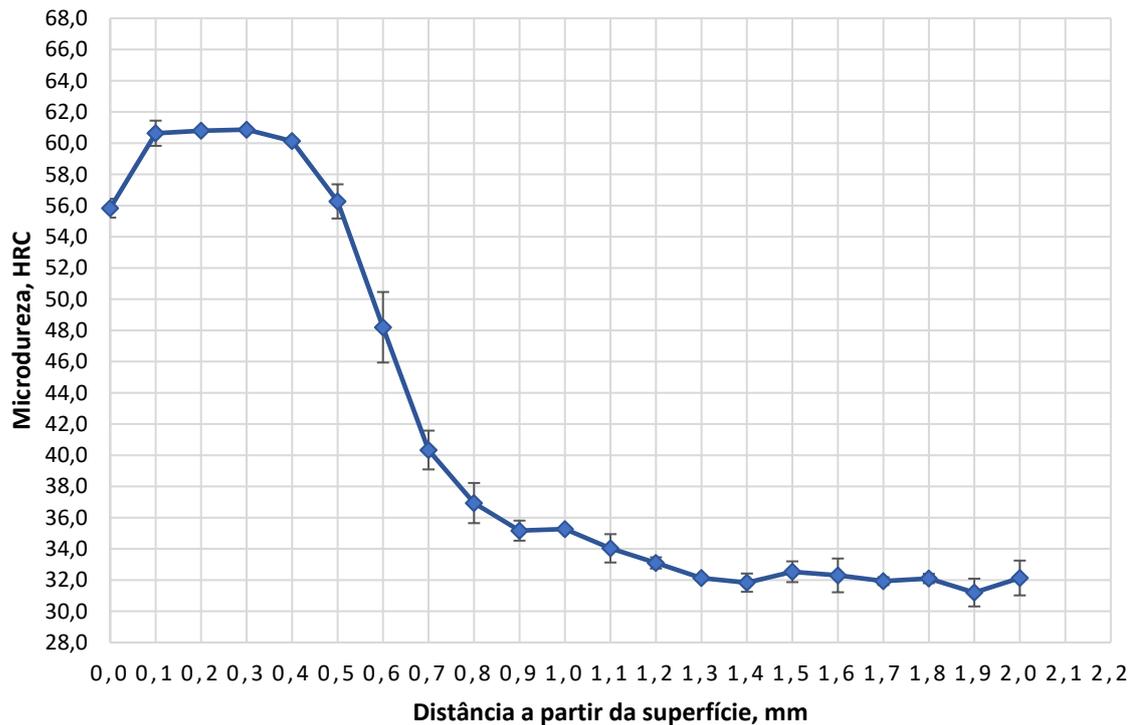
Mesmo com este novo dimensionamento na largura de face do dente da engrenagem (vide perfis nas Fig. 34 e 35), os resultados foram satisfatórios para o nível de dureza e a profundidade da camada endurecida. Tal fato também possibilitou uma boa reprodutibilidade dos resultados satisfatórios para as engrenagens com largura de face dos dentes de 12,5 mm, devido à aplicação da referida metodologia de cementação sólida.

Figura 34. Perfil de microdureza na amostra-3 (largura de face dos dentes = 22,0 mm).



Fonte: Autor (2019)

Figura 35. Perfil de microdureza na amostra-4 (largura de face dos dentes = 22,0 mm).

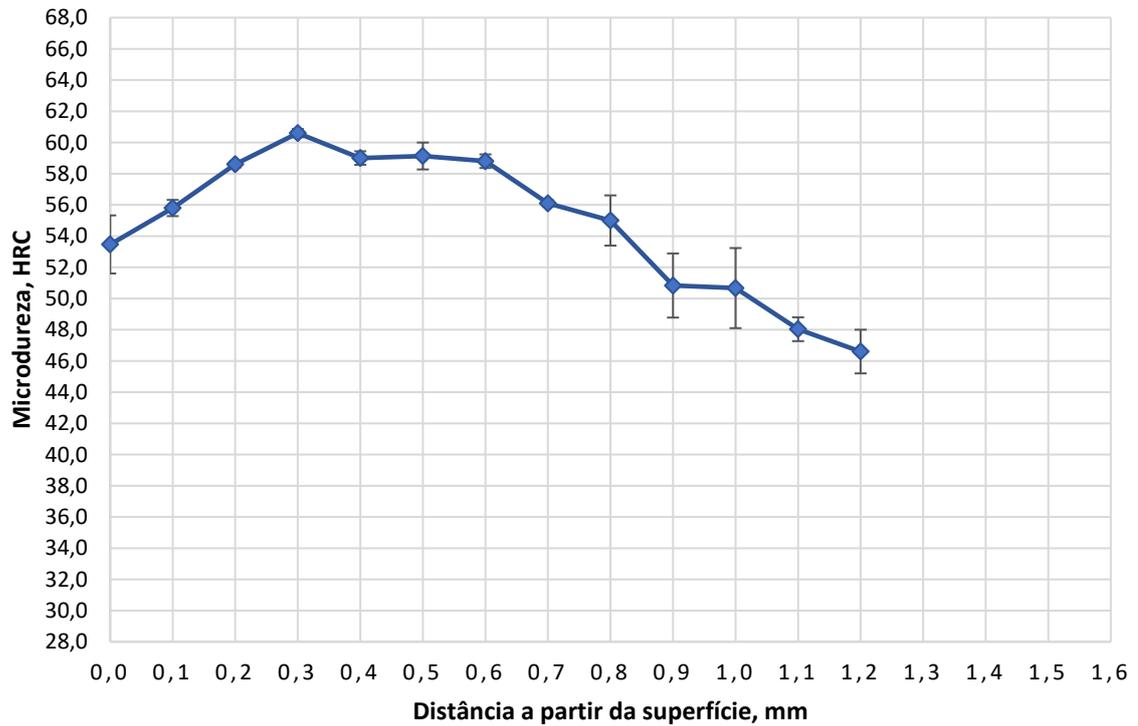


Fonte: Autor (2019)

Os perfis de microdureza apresentados nas Fig. 36 e 37 são da amostra 5, sendo aquela referenciada nas macrografias das Fig. 21 e 22 (ver pág. 38). Na Fig. 36 temos o perfil de dureza medido a partir do topo do dente, no qual os valores de dureza acima de 50 HRC ultrapassaram o valor limite de 0,60 mm para a profundidade da camada cementada (no caso de engrenagens com módulo 2). Provavelmente isto ocorreu pela dimensão incorreta no dente desta engrenagem, fato verificado na macrografia da Fig. 22 – a dimensão no topo do dente da amostra 5 é cerca de 50% menor do que nas amostras 3 e 4. E tal fato, possivelmente, também favoreceu a maior proximidade das camadas endurecidas formadas no adendo do dente (região que vai da metade da altura até o topo do dente).

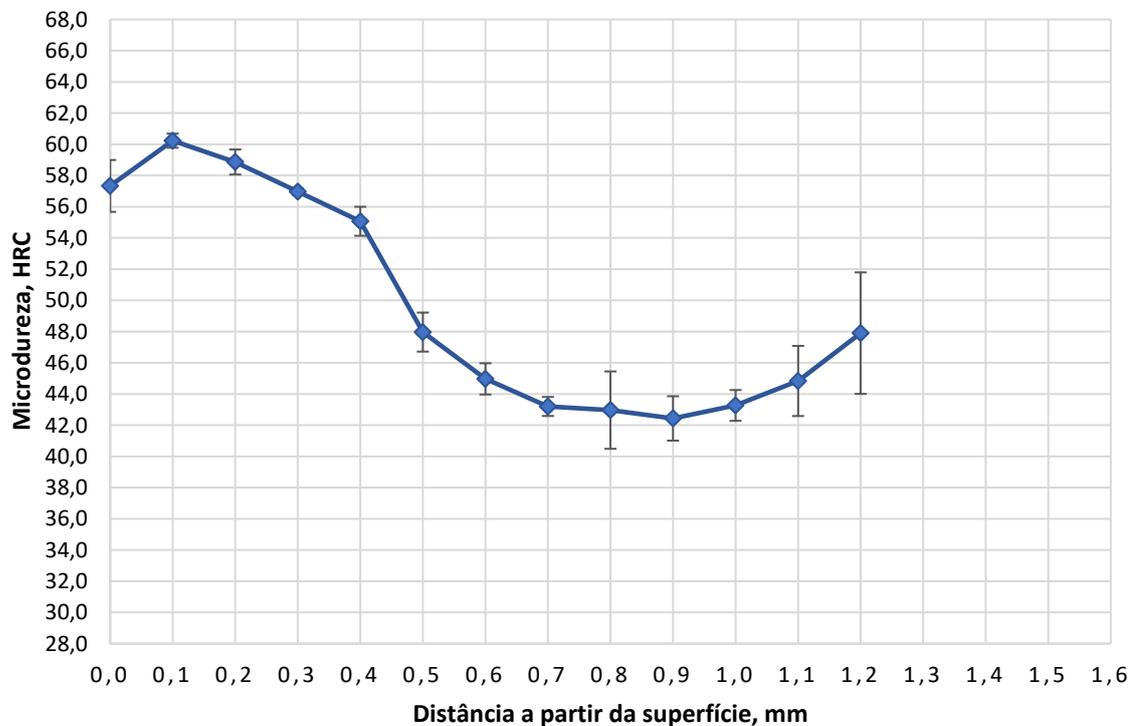
Devido à situação verificada anteriormente com auxílio do gráfico da Fig. 36, optou-se por fazer medições de microdureza na lateral do dente da amostra 5 visto na Fig. 37. Os valores de dureza acima de 50 HRC atingiram uma profundidade de cerca de 0,50 mm. Nesta condição específica, os resultados seriam satisfatórios para a prática de cementação aplicada. Porém, no referido gráfico (ver Fig. 37) há um evidente crescimento nos níveis de dureza após a profundidade de aproximadamente 1,0 mm. Isto se deve, provavelmente, pela proximidade da camada cementada na lateral oposta do dente. Logo, os resultados aqui não podem ser considerados satisfatórios como um todo – principalmente devido ao problema notado na dimensão do topo do dente da engrenagem.

Figura 36. Perfil de microdureza na amostra-5 (largura de face dos dentes = 22,0 mm). Topo do dente.



Fonte: Autor (2019)

Figura 37. Perfil de microdureza na amostra-5 (largura de face dos dentes = 22,0 mm). Lateral do dente.



Fonte: Autor (2019)

5. CONCLUSÃO

Os valores obtidos para a dureza na profundidade efetiva da camada cementada foram considerados satisfatórios nas engrenagens com largura de face dos dentes de 12,5 mm e também naquelas com largura de face dos dentes de 22,0 mm. Em ambos os casos, os valores de dureza ficaram acima de 50 HRC e dentro da faixa de 0,40-0,60 mm a partir do topo do dente (condição para engrenagens com módulo 2). A partir destas constatações, verificou-se que houve reprodutibilidade dos resultados satisfatórios com a aplicação dos procedimentos adotados no trabalho de Garcia (2017).

O defeito na fabricação da engrenagem de onde foi retirada a amostra 5, no que diz respeito à dimensão incorreta no topo do dente, comprometeu o resultado para os níveis de dureza e a profundidade da camada cementada. Ainda assim, a medição de microdureza efetuada no adendo do dente (partindo da lateral para o centro) gerou resultados satisfatórios em relação ao procedimento aplicado de cementação sólida – foram obtidos valores acima de 50 HRC dentro da faixa de 0,40-0,60 mm.

A análise metalográfica comprovou que houve formação de uma microestrutura tipicamente martensítica na camada cementada em todas as amostras analisadas. Notou-se também que se formou uma região de transição entre esta camada e o núcleo dos dentes das engrenagens. Na região de transição a microestrutura de martensita não era tão nítida como aquela observada na camada cementada junto à superfície dos dentes.

REFERÊNCIAS

- AÇOS VILLARES S.A. **Aços para Construção Mecânica** – aços para cementação. Catálogo técnico, p. 12-15.
- ASM International Handbook Committee. **ASM Metals Handbook** – Heat Treating. 10ed. vol. 4, printed in the United States of America, 1991.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Maquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011.
- CALLISTER Jr., W. D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CASILLAS, A. L. **Máquinas: formulário técnico**. 3. ed. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1981.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2002.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão de André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. rev. atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- DAVIS, J. R. Surface Hardening of Steel. ASM International, p. 118, 2002. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=eIfcHJtv_kcC&printsec=frontcover&dq=DAVIS,+J.+R.+Surface+Hardening+of+Steel.+ASM+International&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwidq6uxy83XAhUCDZAKHV3RBXwQ6AEIJjAA#v=onepage&q=DAVIS%2C%20J.%20R.%20Surface%20Hardening%20of%20Steel.%20ASM%20Internati onal&f=false> Acesso em: 25 ago. 2017.
- DAVIS, J. R *et al.* Gear Materials, Properties, and Manufacture. ASM International, 2005.
- FISCHER, Ulrich *et al.* **Manual de tecnologia metal mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- FLORES, P.; GOMES, J. **Cinemática e Dinâmica de Engrenagens: Teoria e Exercícios de Aplicação**. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2015.
- GARCIA, Natália Gonçalves. Estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aços SAE 4320. 2017. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Fabricação Mecânica) – Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul-Rau, Jaraguá do Sul, 2017.
- GIECK, R. **Manual de Fórmulas Técnicas**. 4. ed. São Paulo: Hemus, 1996.
- HOSSEINI, S. R. E. *Simulation of Case Depth of Cementation Steels According to Fick's Laws*. **Journal Of Iron and Steel Research**, v. 19, n. 11, p.71-78, nov. 2012.
- KOWSER, A.; MOTALLEB, A. *Effect of Quenching Medium on Hardness of Carburized Low Carbon Steel for Manufacturing of Spindle used in Spinning Mill*. **Procedia Engineering**, v. 105, p.814-820, 2015.

KRAUSS, G. *Steels: Heat treatment and processing principles*. ASM International, p.286, 1990.

LAMPMAN, S. *Introduction to Surface Hardening of Steels*. Heat Treating, Vol. 4, ASM Handbook, ASM International, vol. 4A, p.259–267, 1991. Revised by Michael J. Schneider, and Madhu S. Chatterjee. Disponível em: <<http://asminternational.org>> Acesso em: ago.2017.

MAZZO, Norberto. **Engrenagens cilíndricas: da concepção à fabricação**. São Paulo: Blucher, 2013. p. 793 - 795.

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

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

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

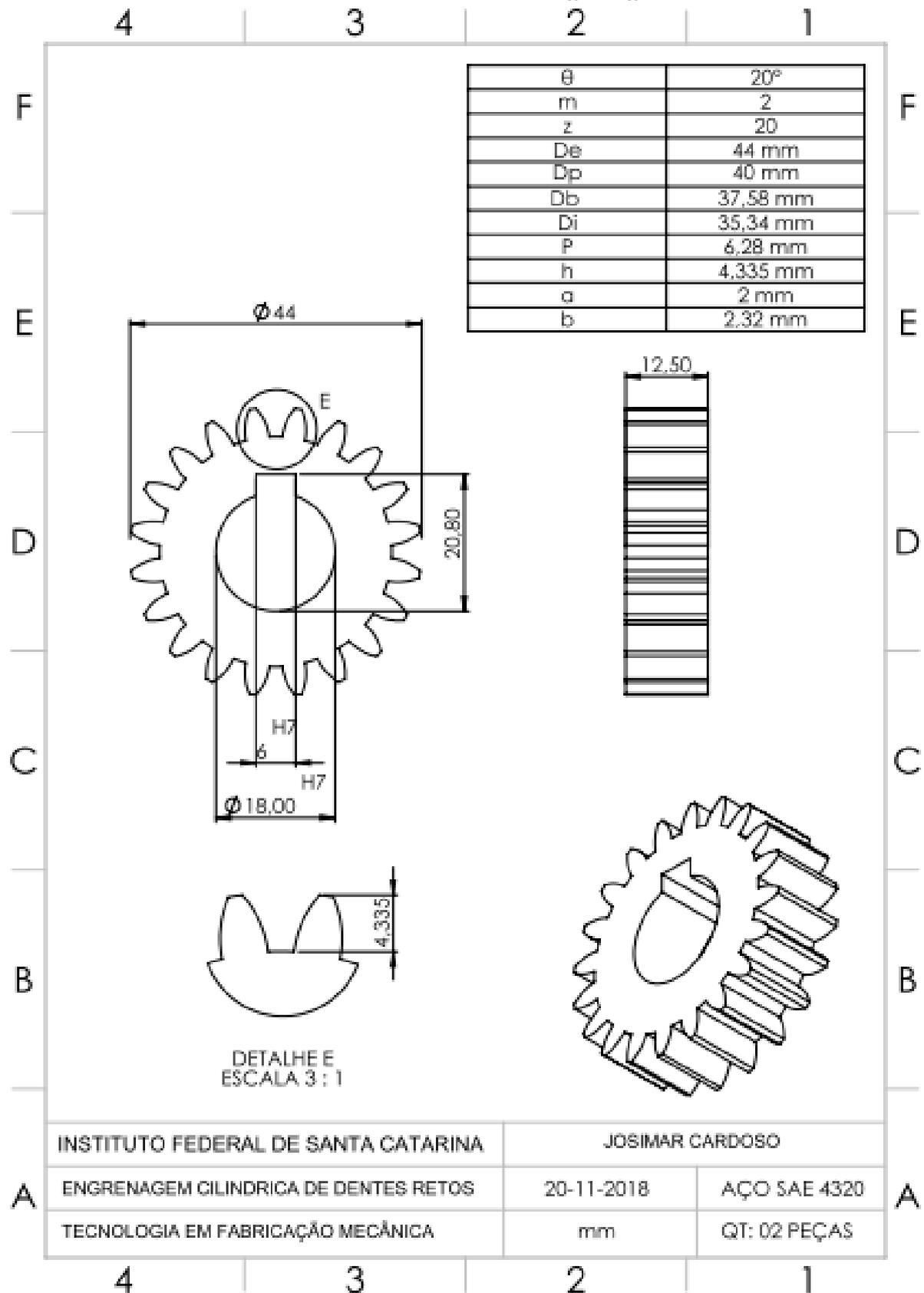
WICK, C.; VEILLEUX, R. F. *Materials, finishing and coating*. vol.3, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Society of Manufacturing Engineers, 1985.

Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/datavisa/Substancia/CodigoCAS.htm>>
Acesso em: 19 fev. 2019

Soluções Industriais. Disponível em:

<<https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/metal-mecanica-e-usinagem/merati/produtos/ferramentaria-e-modelacao/engrenagem-cilindrica-de-dentes-retos>>
Acesso em: 19 fev. 2019

APÊNDICE A – Desenho técnico da engrenagem modelo 1



APÊNDICE B – Desenho técnico da engrenagem modelo 2

