

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

BRUNO LESSMANN FERTIG

ESTUDO EXPERIMENTAL DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS  
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS (MÓDULO 2) DE AÇO SAE 8620

JARAGUÁ DO SUL

Julho 2021

BRUNO LESSMANN FERTIG

ESTUDO EXPERIMENTAL DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS  
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS (MÓDULO 2) DE AÇO SAE 8620

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.

JARAGUÁ DO SUL

Julho 2021

Fertig, Bruno L.

Título: Estudo experimental da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620/ Bruno L. Fertig ;

Orientação de Jean S. Pimenta.

Jaraguá do Sul, SC, 2021.

65p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica.

Inclui referências.

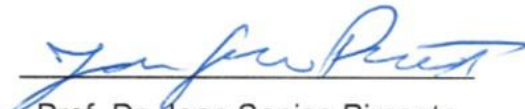
1. Cementação sólida 2. Difusão atômica. 3. Engrenagem. 4. Aço SAE 8620. I. Pimenta, Jean S. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Estudo experimental da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620.

BRUNO LESSMANN FERTIG

ESTUDO EXPERIMENTAL DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS  
CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS (MÓDULO 2) DE AÇO SAE 8620

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, 26 de julho de 2021

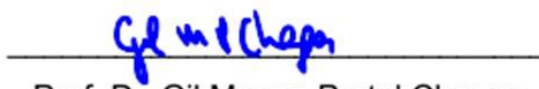


---

Prof. Dr. Jean Senise Pimenta

Orientador


IFSC – Campus Jaraguá do Sul – RAU



---

Prof. Dr. Gil Magno Portal Chagas

IFSC – Campus Jaraguá do Sul – Rau



---

Prof. Dr. Joel Stryhalski

IFSC – Campus Jaraguá do Sul - Rau

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos docentes do CSTFM por todo conhecimento repassado e dedicação durante o período em que estive cursando, em especial ao professor Jean Senise Pimenta pelo companheirismo exercido e toda a experiência compartilhada durante nossa convivência. Agradeço também a ele pela oportunidade que me foi concedida para colaborar em atividades práticas no Laboratório de Ensaio e Materiais, onde pude aprimorar meus conhecimentos nessa área durante minha formação acadêmica.

Agradeço aos demais servidores do Campus Jaraguá do Sul-Rau, que de alguma forma auxiliaram no funcionamento do curso e nas atividades curriculares, em especial aos servidores do setor de Apoio Técnico, Gustavo J. da Silva e Marcelo Malewschik, pelo grande auxílio na fabricação das engrenagens e na manutenção dos equipamentos dos laboratórios ao longo do projeto.

Agradeço também pelo auxílio financeiro ao pesquisador e pela bolsa PIBITI financiada pelo CNPq do Edital N°02/2019/PROPPI-Universal para execução deste trabalho.

Por fim agradeço a minha família e aos meus amigos por todo apoio e ajuda pessoal que foi compartilhada durante o curso.

## RESUMO

A cementação sólida é um tratamento termoquímico que introduz carbono na superfície de uma peça de aço, aumentando a concentração desse elemento até certa profundidade. Com o resfriamento brusco dessa peça, forma-se uma microestrutura martensítica numa região logo abaixo da superfície onde houve a difusão de carbono atômico devido à cementação. Esse tratamento é usualmente aplicado em engrenagens e tem como proposta aumentar sua dureza na superfície, a resistência ao desgaste e à fadiga, conservando o núcleo dúctil e tenaz para melhor absorção de impacto na peça. Esse trabalho tem como objetivo principal elaborar um procedimento experimental viável de cementação sólida para engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620, que cumpra requisitos de dureza e profundidade da camada cementada. Primeiramente foi realizado um estudo baseado na equação da segunda lei de Fick para a difusão do carbono no ferro- $\gamma$  a 900°C, sendo obtidos os tempos de difusão atômica para condições específicas. A partir disso, foram testadas três condições de cementação – após cada procedimento, as peças foram submetidas ao tratamento de têmpera direta em óleo, logo que retiradas da caixa de cementação, e posterior revenimento. As amostras removidas de cada peça cementada foram analisadas por metalografia e ensaios de microdureza para verificação da profundidade da camada (perfis de dureza foram traçados). Nestes ensaios foram analisados requisitos de dureza e profundidade da camada segundo critérios técnicos: valores de módulo ( $m$ ) na faixa de  $2,0 \leq m < 2,5$  devem ter a profundidade da camada endurecida efetiva entre 0,40-0,60 mm com valores de dureza acima de 50 HRC. A análise metalográfica revelou nas condições testadas a formação de uma microestrutura martensítica junto à superfície das peças cementadas, contendo uma provável distribuição de austenita retida. Resultados satisfatórios que cumpriram os requisitos técnicos pré estabelecidos foram selecionados a partir dos experimentos em engrenagens com largura de face 12,50 mm, destacando-se duas condições específicas – variáveis  $C_x = 0,40\%C$  (tempo de 2h19min) e  $C_x = 0,45\%C$  (tempo de 2h51min). De acordo com os critérios técnicos mencionados, os resultados mais satisfatórios foram obtidos para a cementação na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$ . Testes de reprodutibilidade foram realizados em engrenagens com largura de face 20,00 mm na condição de cementação citada anteriormente. Os resultados obtidos neste último conjunto de experimentos também foram satisfatórios, segundo os requisitos de dureza e profundidade da camada efetiva. Concluiu-se que o procedimento desenvolvido neste estudo de cementação sólida na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  foi considerado satisfatório e viável para esse tipo e tamanho de engrenagem de aço SAE 8620.

Palavras-Chave: Cementação sólida. Difusão atômica. Engrenagem. Aço SAE 8620.

## ABSTRACT

Pack carburizing is a thermochemical treatment that diffuses carbon in the surface of a steel part, increasing the concentration of this chemical element until certain depth. Through quenching it is formed a martensitic microstructure in the superficial region that was affected by the diffusion of atomic carbon during the process of carburizing. This treatment is usually applied in gears and it makes the mechanical part more wear resistant while its core remains ductile and tough for better absorption of impact. The main objective of this study is to develop a viable experimental process of pack carburizing for spur gears (module 2) made of steel SAE 8620, which performs technical requirements based on consulted references. First of all it was made a study based on second Fick's Law for the diffusion of atomic carbon in iron- $\gamma$  in the temperature of 900°C, then being obtained different diffusion time for specific conditions. Thereby three carburizing conditions were tested - for each procedure the samples were submitted by direct quenching in oil, as soon as removed from the oven, and then tempered. These samples were analyzed by optic metallography and microhardness tests to verify the depth of the case (hardness profiles were made). In these tests, hardness and case depth were analyzed according to requirements: for module ( $m$ ) in range of  $2,0 \leq m < 2,5$  the effective case depth must be between 0,40-0,60 mm with hardness values above 50 HRC. The metallographic analysis revealed for all tested conditions the formation of a martensitic microstructure along the surface of the parts, containing a probable distribution of retained austenite. Satisfactory results that met the pre-disclosed technical requirements were selected from the experiments with gear width 12,50 mm, when used two different conditions of carburizing – variable  $C_x = 0,40$  %C (time 2h19min) and  $C_x = 0,45$  %C (time 2h51min). According to the mentioned technical requirements, the most satisfactory results were obtained for carburizing in the condition of the variable  $C_x = 0,40$  %C. Reproducibility tests were made on gears with face width 20,00 mm according to the same carburizing condition cited above. The obtained results from this last set of experiments were satisfactory too, in consonance with technical requirements of hardness and effective case depth. It was concluded that the process used in this study for pack carburizing with the condition of the variable  $C_x = 0,40$ %C time of 2h19min was considered satisfactory and viable for this type and size of SAE 8620 steel gear.

Keywords: Pack carburizing. Atomic diffusion. Spur gear. SAE 8620 steel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Nomenclatura para os dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	16
Figura 2 - Dimensionamento do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos para as variáveis: P- força tangencial exercida no dente; H- altura do dente; b- largura da face; h- espessura do dente na raiz. ....	17
Figura 3 - Parte do diagrama Fe-Fe <sub>3</sub> C estando indicado o limite de solubilidade do carbono na fase austenita de alguns aços AISI em função da temperatura. ....	22
Figura 4 - Diagrama de revenimento em amostras de aço SAE 8620 (relação $L_o = 4 \varnothing$ ): normalização a 910°C, cementação a 920°C por 4 h, têmpera em óleo a partir de 830°C e revenido por 2 h. ....	24
Figura 5 - Diagrama de revenimento na camada cementada em amostras de aço SAE 8620 ( $\varnothing$ 22 x 10 mm): normalização a 910°C, cementação a 920°C (banho de sais), têmpera direta em óleo e revenido por 2 h. ....	24
Figura 6 - Análise da cementação sólida em função do tempo; seções transversais atacadas por Nital. ....	27
Figura 7 - Macrografia na seção transversal de uma engrenagem cementada, mostrando trincas visíveis nas raízes dos dentes. Ataque: Iodo. ....	28
Figura 8 - Gráfico esquemático para a profundidade efetiva da camada cementada em função da dureza. ....	29
Figura 9 - Estudo de Garcia (2017), amostra-1 (cementação do aço SAE 4320 por 2,4 h a 900°C): a) perfil do dente cementado, aumento 200X; b) ampliação da região anterior, mostrando microestrutura martensítica na superfície do dente, aumento 400X. Ataque: Nital 2 ..... 30	30
Figura 10 - Perfil de microdureza na amostra-1 na cementação aço SAE 4320 por 2,4 h a 900°C. ....	30
Figura 11 - Perfil de microdureza na amostra-1 (largura de face = 12,50 mm), cementação aço SAE 4320. ....	31
Figura 12 - Perfil de microdureza na amostra-4 (largura de face = 22,00 mm), cementação aço SAE 4320. ....	31
Figura 13 - Organograma com as etapas da metodologia utilizada neste trabalho. ....	33
Figura 14 - Procedimentos de fabricação das engrenagens: a) torneamento para o diâmetro de 44,00 mm; b) pré-sangramento; c) fresamento dos dentes; d) corte com o bedame. ....	34
Figura 15 - Engrenagens fabricadas para cementação: a) total de 12 peças; b) detalhe para a largura de face das engrenagens. Escala em milímetros. ....	35
Figura 16 - Engrenagens colocadas sobre a primeira camada da mistura no fundo da caixa de cementação. ....	40
Figura 17 - Ilustração esquemática com os locais de medição de microdureza nos dentes das engrenagens cementadas (ver linhas pontilhadas). ....	42
Figura 18 - Micrografia do aço SAE 8620 deste trabalho: a) presença de grãos de ferrita (fase clara), grãos de perlita (fase escura), aumento 200X; b) Ampliação da região anterior, destacando uma fina dispersão de carbonetos na matriz de ferrita e perlita, aumento 400X. Ataque nital 3%. ....	43
Figura 19 - Macrografias na condição da variável $C_x = 0,40\%C$ e cementação sólida por 2h19min a 900°C: a) amostra-1; b) amostra-2. Ataque nital 3%. ....	44
Figura 20 - Macrografias na condição da variável $C_x = 0,45\%C$ e cementação sólida por 2h51min a 900°C: a) amostra-3; b) amostra-4. Ataque nital 3%. ....	44
Figura 21 - Macrografias na condição da variável $C_x = 0,50\%C$ e cementação sólida por 3h29min a 900°C: a) amostra-5; b) amostra-6. Ataque nital 3%. ....	44

Figura 22 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para $C_x = 0,40\%C$ (cementação por 2h19min a 900°C): a) amostra-1, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-2, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%. .....	46
Figura 23 - Micrografias no topo do dente na condição de $C_x = 0,40\%C$ (ampliação das regiões na Fig. 22): a) amostra-1; b) amostra-2. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X, ataque nital 3%. .....	46
Figura 24 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para $C_x = 0,45\%C$ (cementação por 2h51min a 900°C): a) amostra-3, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-4, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%. .....	47
Figura 25 - Micrografias no topo do dente na condição de $C_x = 0,45\%C$ (ampliação das regiões na Fig. 24): a) amostra-3; b) amostra-4. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X. Ataque nital 3%. .....	47
Figura 26 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para $C_x = 0,50\%C$ (cementação por 3h29min a 900°C): a) amostra-5, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-6, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%. .....	48
Figura 27 - Micrografias no topo do dente na condição de $C_x = 0,50\%C$ (ampliação das regiões na Fig. 26): a) amostra-5; b) amostra-6. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X, ataque nital 3%. .....	48
Figura 28 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável $C_x = 0,40\%C$ (cementação sólida por 2h19min a 900°): a) amostra-1; b) amostra-2. ....	50
Figura 29 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável $C_x = 0,45\%C$ (cementação sólida por 2h51min a 900°): a) amostra-3; b) amostra-4. ....	50
Figura 30 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável $C_x = 0,50\%C$ e (cementação sólida por 3h29min a 900°): a) amostra-5; b) amostra-6. ....	51
Figura 31 - Macrografias na condição para $C_x = 0,45\%C$ e cementação por 2h51min a 900°C (teste de reprodutibilidade, largura de face = 12,50 mm): a) amostra-7; b) amostra-8. Ataque nital 3%. .....	52
Figura 32 - Macrografias na condição para $C_x = 0,40\%C$ e cementação por 2h19min a 900°C (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-9; b) amostra-10. Ataque nital 3%. .....	52
Figura 33 - Macrografias na condição para $C_x = 0,40\%C$ e cementação por 2h19min a 900°C (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-11; b) amostra-12. Ataque nital 3%. .....	53
Figura 34 - Micrografia na lateral do dente da amostra-7, largura de face 12,50 mm (variável $C_x = 0,45\%C$ , cementação por 2h51min a 900°C): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%. .....	53
Figura 35 - Micrografia na lateral do dente da amostra-8, largura de face 12,50 mm (variável $C_x = 0,45\%C$ , cementação por 2h51min a 900°C): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%. .....	54
Figura 36 - Micrografia no topo do dente da amostra-9, largura de face 20,00 mm (variável $C_x = 0,40\%C$ , cementação por 2h19min a 900°C). Presença de regiões distintas a partir da superfície: a) camada endurecida; b) zona de transição; c) núcleo do dente. Aumento 100X. Ataque nital 3%. .....	54
Figura 37 - Micrografia no topo do dente da amostra-9 (variável $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) igual região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual	

de austenita retida junto à superfície (regiões claras). Ataque nital 3%.....	55
Figura 38 - Micrografia no topo do dente da amostra-10, largura de face 20,00 mm ( $C_x = 0,40\%C$ ): a) camada cementada junto à superfície com dispersão de austenita retida (regiões claras) e início da zona de transição; b) interface zona de transição e início do núcleo do dente. Aumento 200X. Ataque nital 3%.....	56
Figura 39 - Micrografia no topo do dente da amostra-10 (variável $C_x = 0,40\%C$ ). Microestrutura martensítica contendo dispersão de austenita retida (regiões claras). Aumento 400X. Ataque nital 3%.....	56
Figura 40 - Micrografia no topo do dente da amostra-11, largura de face 20,00 mm (variável $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.....	57
Figura 41 - Micrografia no topo do dente da amostra-12, largura de face 20,00 mm (variável $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.....	57
Figura 42 - Perfis de microdureza na condição da variável $C_x = 0,45\%C$ e cementação sólida por 2h51min a 900° (teste de reprodutibilidade, largura de face = 12,50 mm): a) amostra-7; b) amostra-8.....	58
Figura 43 - Perfis de microdureza na condição da variável $C_x = 0,40\%C$ e cementação sólida por 2h19min a 900° (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-9; b) amostra-10.....	59
Figura 44 - Perfis de microdureza na condição da variável $C_x = 0,40\%C$ e cementação sólida por 2h19min a 900° (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-11; b) amostra-12.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relações da largura de face em função do módulo da engrenagem. ....	18
Tabela 2 - Composições químicas típicas do aço SAE 8620 (% peso), conforme normas SAE e DIN. ....	19
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço SAE 8620 e os respectivos tratamentos térmicos. ....	19
Tabela 4. Relação da profundidade de cementação com o módulo normal de rodas dentadas. ....	28
Tabela 5. Composição química do aço SAE 8620 (% peso), segundo dados do fabricante. ....	32
Tabela 6. Composição química (% peso) e registro CAS dos componentes da mistura carburizante usada na cementação sólida, segundo dados do fabricante Wolf. Hacker & Cia Ltda. ....	32
Tabela 7. Características físicas do óleo de têmpera South Oil Temp MO 32. ....	33
Tabela 8. Nomenclatura para as amostras removidas das engrenagens cementadas e analisadas nesse estudo. ....	42

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Objetivo geral .....	14
1.1.2 Objetivo específico .....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 Engrenagens .....	15
2.1.1 Engrenagem cilíndrica de dentes retos .....	15
2.2 Mecanismo de difusão atômica .....	20
2.3 Tratamentos térmicos e termoquímicos .....	23
2.3.1 Têmpera e Revenimento .....	23
2.3.2 Cementação .....	25
2.3.2.1 Cementação Sólida .....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1 Materiais .....	32
3.2 Métodos .....	33
3.2.1 Dimensionamento e fabricação das engrenagens .....	33
3.2.2 Cálculo do tempo para difusão do carbono .....	35
3.2.3 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico .....	39
3.2.4 Práticas Laboratoriais .....	40
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	43
4.1 Caracterização do aço SAE 8620 .....	43
4.2 Análise macrográfica – verificação preliminar.....	44
4.3 Análise metalográfica – verificação preliminar.....	45
4.4 Ensaio de microdureza – verificação preliminar.....	49
4.5 Experimentos de reprodutibilidade.....	52
4.5.1 Análise macrográfica .....	52
4.5.2 Análise metalográfica .....	53
4.5.3 Ensaio de microdureza .....	57
5 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS .....	62
APÊNDICE A- Desenho técnico das engrenagens cilíndricas com largura de face 12,5 mm.	64
APÊNDICE B- Desenho técnico das engrenagens cilíndricas com largura de face 20,0 mm.	65

## 1. INTRODUÇÃO

Os elementos de máquinas conhecidos como engrenagens são usados na transmissão de movimento rotativo e torque entre eixos, sendo no geral cilindros dentados projetados para não haver travamento ou perda de contato entre os dentes. Uma engrenagem se refere ao conjunto de, pelo menos, duas rodas dentadas (uma motora e a outra movida), que serve para uma dada transmissão mecânica; tecnicamente roda dentada seria o termo mais adequado quando for se referir a apenas um destes componentes (MAZZO, 2013).

A engrenagem cilíndrica de dentes retos é o tipo mais comum de engrenagem na Mecânica. Este tipo de engrenagem é projetado para que seus eixos sejam paralelos entre si e transmitam movimento circular contínuo de baixa rotação (NORTON, 2004; MAZZO, 2013).

Na fabricação de engrenagens devem-se usar aços de baixo-carbono ou de baixa-liga (RAKHIT, 2000; CHIAVERINI, 2002; COLPAERT, 2008). Isto se deve para que o material seja submetido a um conjunto de tratamentos térmicos para, então, ser gerada uma fina camada abaixo da superfície que resulte em maior dureza, resistência à fadiga e ao desgaste no contato dos dentes, mantendo-se o núcleo da peça com aspecto dúctil e tenaz.

O aço SAE 8620 é um aço de baixa-liga recomendado para o tratamento termoquímico de cementação, sendo um aço ligado ao níquel, cromo e molibdênio que apresenta boa condição de temperabilidade (CHIAVERINI, 2002). Este aço pode ser usado na fabricação de diversos componentes mecânicos: pinos-guia; anéis de engrenagem; colunas; cruzetas; catracas; eixos; coroas; virabrequins; eixos-comando; pista e esfera de rolamento; pinos; pinhões e engrenagens em geral (DAVIS, 2005).

O tratamento termoquímico de cementação sólida é o mais antigo e econômico para o endurecimento superficial de engrenagens; os outros tipos deste tratamento são: a líquida; a gasosa; e a cementação a vácuo (emprega vácuo grosseiro e pressão parcial de gás hidrocarboneto) (DAVIS, 2005; HOSSEINI, 2016). Na cementação sólida as peças devem ser adequadamente colocadas e espaçadas dentro de caixas metálicas, sendo este conjunto aquecido na temperatura de austenitização do aço no geral entre 850°C e 950°C (CHIAVERINI, 2002; HOSSEINI, 2016). Nestas caixas coloca-se uma mistura carburante rica no elemento químico endurecedor (o carbono). A difusão atômica do carbono é facilitada na temperatura em que o aço está no campo de fase Fe- $\gamma$ . Na difusão do carbono para o interior do aço, o teor deste elemento junto à superfície aumenta se comparado ao núcleo da peça (COLPAERT, 2008; CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

As leis de Fick estabelecem importantes critérios para o estudo dos mecanismos de difusão atômica. Grande parte das situações práticas na difusão atômica está no regime não estacionário, onde o fluxo difusional e o gradiente de concentração que estão num ponto específico dentro do sólido variam com o tempo; a aplicação de adequadas condições de contorno possibilita a resolução da Segunda Lei de Fick neste regime (CALLISTER e RETHWISCH, 2015). Dentre as variáveis na equação desta lei de Fick, tem-se aquela que indica uma concentração constante na superfície do sólido, ou seja, a solubilidade máxima de carbono na fase austenita do aço. Essa solubilidade é dependente da temperatura à qual o aço será submetido e de sua composição química (HOSSEINI, 2012).

O tratamento térmico de têmpera deve ser feito logo após a cementação quando a peça deve ser resfriada bruscamente num meio adequado para se obter martensita na microestrutura do aço, formando-se então uma fina camada endurecida abaixo da superfície da peça. Isto é possível devido à prévia difusão do carbono para a fase austenítica do aço na cementação (CHIAVERINI, 2002; COLPAERT, 2008).

Os meios de têmpera variam em severidade, ou seja, em velocidade de resfriamento; então, para se evitar deformação na geometria de peças de pequenas dimensões, costuma-se recomendar o uso de óleo de têmpera (KOWSER, 2015). Grande parte das engrenagens cementadas é submetida à têmpera direta em óleo logo após o tratamento de cementação; as engrenagens fabricadas de aços alta-liga (teor de elementos de liga >10%) primeiro são resfriadas ao ar logo após a prática de cementação e, então, depois são reaquecidas e temperadas para uma menor distorção nas peças (RAKHIT, 2000; CHIAVERINI, 2002). Aços usados na fabricação de engrenagens podem atingir uma dureza superficial no dente em torno de 60 Rockwell C (HRC), enquanto que a dureza no núcleo do dente fica entre 32-48 HRC (DAVIS, 2005).

Após o tratamento de têmpera, faz-se necessário o tratamento de revenimento visando o alívio de tensões na rede cristalina devido à formação da martensita. Este tratamento consiste em aquecer a peça numa temperatura abaixo da zona crítica (abaixo do patamar eutetóide, segundo estudo do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C), mantendo-a nessa temperatura por um tempo adequado e seguido de resfriamento lento dentro do forno (SILVA e MEI, 2010).

A utilização consciente do tratamento de cementação sólida em elementos mecânicos requer um procedimento adequado para sua aplicação, visto que o mesmo não possibilita um controle rigoroso da profundidade da camada cementada (CHIAVERINI, 2002). Caso contrário, pode-se ter como consequência a menor vida útil da peça. Logo, tem-se a necessidade de um estudo experimental para uma aplicação satisfatória deste tratamento.

Neste trabalho de pesquisa aplicada pretende-se elaborar um adequado procedimento de cementação sólida de engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2), aplicando têmpera direta em óleo após cementação das peças de aço SAE 8620. Buscar-se-á obter uma solução tecnológica viável para endurecimento superficial desse tamanho de engrenagem, que poderá ser usada em especial por empresas de pequeno porte do setor metalmeccânico.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Realizar estudo experimental de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620, avaliando sua aplicabilidade em engrenagens com mesmo módulo e diferentes larguras de face.

### **1.1.2 Objetivo específico**

- Analisar a influência de diferentes teores de carbono na profundidade de 0,40 mm, baseado em cálculos da segunda Lei de Fick (regime não estacionário) para a cementação sólida a 900°C em engrenagens de aço SAE 8620;
- Verificar a formação e profundidade da camada endurecida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2), após práticas de cementação sólida seguida de têmpera direta em óleo e revenimento, usando técnicas de macrografia e metalografia óptica, e ensaio de microdureza na escala Rockwell C;
- Verificar a repetição dos resultados satisfatórios, de acordo com parâmetros técnicos específicos para a profundidade e dureza, por meio de novos experimentos de cementação em engrenagens com mesma largura de face (12,50 mm);
- Constatar a aplicabilidade deste procedimento de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de mesmo módulo e com maior largura de face (20,00 mm), que atende requisito de maior resistência mecânica sob esforço de flexão nos dentes;
- Elaborar um procedimento experimental viável para a cementação sólida com têmpera direta nesse tipo e tamanho de engrenagem.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Engrenagens

Engrenagens são elementos de máquinas que geram movimento rotatório e transmitem potência através do engrenamento sucessivo de seus dentes (DAVIS, 2005). Tais elementos são basicamente cilindros dentados que devem ser projetados e fabricados, de modo que não apresentem travamento ou perda de contato entre os dentes.

O termo engrenagem refere-se ao conjunto de, pelo menos, duas rodas dentadas, sendo que uma é a roda motora (pinhão) e a outra a roda movida (engrenagem), servindo como se fossem um tipo de alavanca (MAZZO, 2013; NORTON, 2013). Budynas e Nisbett (2011) consideram que a transmissão de força de um conjunto promove a ocorrência de momentos de torção entre eixos, acarretando a obtenção de um dado movimento rotatório.

Segundo Davis (2005), engrenagens são usadas há mais de três mil anos e possuem grande importância e variedade de aplicações em maquinários nos dias atuais, desde pequenas engrenagens de baixo custo até para fins de grande importância como na indústria aeroespacial e automotiva.

Há uma grande variedade de tipos de engrenagens, destacando os quatro principais: retas; helicoidais; cônicas; e sem-fim. Podemos classificar suas possíveis aplicações em relação à disposição do eixo, como por exemplo, para eixos paralelos, intersectantes e não intersectantes (DAVIS, 2005; BUDYNAS e NISBETT, 2011).

#### 2.1.1 Engrenagem cilíndrica de dentes retos

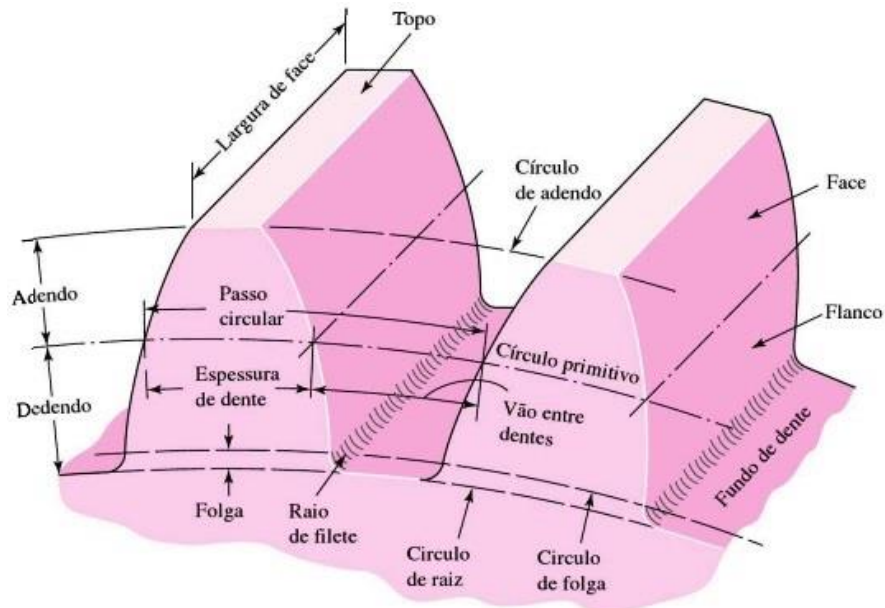
As engrenagens cilíndricas de dentes retos são o tipo mais simples de engrenagem, sendo projetada para transmitir movimento de um eixo paralelo ao outro e possuindo dentes paralelos ao eixo de rotação (BUDYNAS e NISBETT, 2011; NORTON, 2013).

Algumas razões que explicam a grande utilização deste tipo de engrenagem estão na simplicidade e facilidade associada ao projeto, fabricação, montagem e sua manutenção (FLORES e GOMES, 2015). Este tipo de engrenagem é capaz de possuir rendimento de até 99% e proporcionar relações de transmissão de até 8:1, transmitindo assim potências elevadas (NIEMANN, 1971, *apud* FLORES e GOMES, 2015).

Na Figura 1 é mostrado um desenho esquemático indicando a terminologia de dentes de engrenagens retas. Conforme Budynas e Nisbett (2011), “o círculo primitivo é um círculo

teórico sobre o qual todos os cálculos geralmente se baseiam; seu diâmetro é o diâmetro primitivo. Os círculos primitivos de um par de engrenagens engrazadas são tangentes entre si.” A altura do dente é definida pelo adendo (saliência ou altura de cabeça) e o dedendo (reentrância ou altura de pé), que são referidos ao círculo primitivo (NORTON, 2013).

Figura 1 - Nomenclatura para os dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos.



Fonte: BUDYNAS e NISBETT (2011)

#### 2.1.1.1 Determinação dos parâmetros de fabricação

O desenvolvimento do projeto mecânico de engrenagens cilíndricas de dentes retos tem início com a escolha de alguns parâmetros, sendo referenciados como decisão de projeto (BUDYNAS e NISBETT, 2011). Dentre os possíveis parâmetros destacam-se: módulo; número de dentes; o ângulo de pressão; e a largura de face. A partir destes parâmetros, podem ser calculados outros para o dimensionamento da engrenagem.

A fabricação de engrenagens é altamente padronizada nos dias atuais com relação à forma do dente e ao tamanho, de acordo com a *American Gear Manufacturers Association* (AGMA) que especifica padrões para seu projeto, manufatura e montagem (NORTON, 2013).

O ângulo de pressão  $\phi$  de um par de engrenagens é definido como o ângulo entre a linha de ação (normal comum) e a direção da velocidade no ponto de referência (primitivo) tal que a linha de ação seja rodada de um ângulo  $\phi$  em graus na direção de rotação da engrenagem movida, ... Os ângulos de pressão do par de engrenagens são padronizados pelos fabricantes de engrenagens a uns poucos valores, que são definidos na distância nominal entre os centros das engrenagens quando estas são cortadas. Os valores padronizados são  $14,5^\circ$ ,  $20^\circ$  e  $25^\circ$ , sendo  $20^\circ$  o valor mais comumente usado e  $14,5^\circ$ , obsoleto hoje em dia. (NORTON, 2013, p. 685).

De acordo com Gieck (1996), as seguintes equações podem ser empregadas para o dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos:

$$d = m.z \quad (1)$$

$$d_a = d + 2.h_a \quad (2)$$

$$p = \pi.m \quad (3)$$

$$c = 0,167.m \quad (4)$$

$$h = h_a + h_f \quad (5)$$

$$h_a = m \quad (6)$$

$$h_f = m + c \quad (7)$$

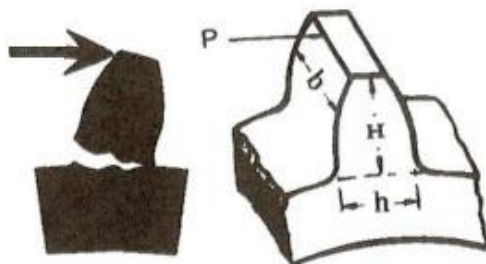
onde tem-se que:  $m$  é o módulo do dente,  $z$  é o número de dentes,  $d$  é o diâmetro primitivo,  $d_a$  é o diâmetro externo (diâmetro da cabeça),  $p$  é o passo diametral,  $c$  é a folga da cabeça,  $h$  é a altura do dente,  $h_a$  é a altura da cabeça do dente,  $h_f$  é a altura da raiz do dente.

Casillas (1981) considera que o dente de uma engrenagem trabalha sob esforço de flexão e que para cálculos específicos, este deve ser considerado como um sólido engastado na base que suporta uma dada carga na extremidade da cabeça. Excluindo-se estudos mais aprofundados para casos comuns, o autor sugere a equação (8) para o dimensionamento e posterior análise da resistência mecânica da engrenagem – as variáveis  $b$  e  $m$  são a largura da face do dente e o módulo do dente, respectivamente.

$$b = 10.m \quad (8)$$

Na Figura 2 é apresentado um desenho esquemático com as dimensões simplificadas do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, o qual fica submetido quando em serviço a uma força tangencial  $P$  exercida no dente.

Figura 2 - Dimensionamento do dente de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos para as variáveis:  $P$ - força tangencial exercida no dente;  $H$ - altura do dente;  $b$ - largura da face;  $h$ - espessura do dente na raiz.



Fonte: CASILLAS (1981)

Pode ser visto na Tabela 1 uma abordagem mais ampla para as relações da largura de face de engrenagens cilíndricas com a qualidade de fabricação do próprio dente e do mancal. Para cálculos mais aprofundados, esta relação da largura de face com o seu módulo poderá auxiliar na avaliação da resistência à tensão de flexão nos dentes da engrenagem.

Tabela 1 - Relações da largura de 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)

#### 2.1.1.2 Materiais para engrenagens – aço SAE 8620

De acordo com Davis (2005), alguns dos requisitos mais importantes para os aços usados na fabricação de engrenagens são:

- Características de processamento;
- Resposta ao tratamento térmico (capacidade de endurecer após endurecimento completo, cementação, nitretação, carbonitretação, endurecimento por indução após têmpera);
- Resistência à fadiga de flexão nos dentes. Isto porque engrenagens cementadas para aplicações de alta performance são sujeitas a um carregamento cíclico – este é uma das propriedades mais importantes para medir a vida útil da engrenagem;
- Resistência ao desgaste e resistência na superfície de contato (*pitting*);
- Resistência à flexão nos dentes da engrenagem.

Engrenagens são fabricadas com uma grande variedade de materiais, dentre eles os aços possuem as melhores propriedades mecânicas requeridas para esses elementos e ainda proporcionando um baixo custo por unidade de peso. A maioria das engrenagens usadas na indústria é feita de aço-carbono ou de aço-liga e esta passa por um tratamento térmico específico, que resulta na melhoria das propriedades mecânicas e aumento da sua vida útil. A

utilização do aço-liga é preferível na fabricação de engrenagens, pois esse material possui maior capacidade de endurecimento para uso destes elementos. Acima de 90% das engrenagens atualmente usadas na indústria são fabricadas de aços-liga. (RAKHIT, 2000)

Segundo Rakhit (2000), dureza é definida como uma propriedade superficial, enquanto a capacidade de endurecimento do aço se refere à profundidade e à distribuição da dureza produzida pela têmpera. Aços com baixa endurecibilidade podem ser endurecidos para uma baixa profundidade e, então, possivelmente não atenderiam requisitos prévios; devem-se adicionar elementos de liga à composição química do aço para aumentar sua endurecibilidade.

Davis (2005) e Colpaert (2008) comentam que o teor de carbono no núcleo de engrenagens cementadas no geral está na faixa de 0,10-0,25%C. Estes autores citam que alguns dos aços-liga de especificação SAE ou AISI mais utilizados na cementação de engrenagens são: 4020, 4026, 4118, 4320, 4620, 4820, 5120, 8620, 8720 e 9310.

O aço SAE 8620 pertence à série 86XX, sendo ligado ao níquel, cromo e molibdênio. Este pode ser caracterizado como um aço baixa-liga, pois o somatório de todos os elementos de liga é menor do que 5% do total (% peso). A Tabela 2 mostra composições químicas típicas deste aço, segundo especificação das normas SAE e DIN; enquanto que na Tabela 3 são apresentadas algumas propriedades mecânicas e os respectivos tratamentos térmicos aplicados ao aço SAE 8620.

Tabela 2 - Composições químicas típicas do aço SAE 8620 (% peso), conforme normas SAE e DIN.

Especificação SAE	Especificação DIN number	C	Mn	Si	P <sub>máx.</sub>	S <sub>máx.</sub>	Ni	Mo	Cr
8620	1.6522, 20NiCrMo2	0,17-0,23	0,60-0,90	0,10-0,25	0,025	0,025	0,40-0,70	0,15-0,25	0,35-0,65
Especificação SAE	Especificação DIN number	C	Mn	Si	P <sub>máx.</sub>	S <sub>máx.</sub>	Ni	Mo	Cr
8620	1.6523, 21NiCrMo2	0,17-0,23	0,60-0,90	0,15-0,35	0,035	0,035	0,40-0,70	0,15-0,25	0,35-0,65

Fonte: ASTM Metals Handbook (1991)

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço SAE 8620 e os respectivos tratamentos térmicos.

Tratamento térmico	Limite de resistência mecânica à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento, em 50 mm (%)	Redução de área (%)	Dureza Brinell (HB)	Resistência ao impacto Izod (J)
normalização a 910°C	635	360	26,3	60	183	100
recozimento a 870°C	540	385	31,3	62	149	115

Fonte: ASTM Metals Handbook (1991)

Segundo Rakhit (2000), alguns elementos de liga presentes na composição do aço afetam significativamente a dureza no núcleo e na superfície do dente da engrenagem:

- Níquel (Ni): dentre outras funções, este elemento também aumenta a capacidade de endurecimento e a resistência à fadiga dos aços;
- Cromo (Cr): é frequentemente usado com outros elementos de liga, tal como o níquel, p.ex., para aumentar a resistência ao desgaste e a capacidade de endurecimento;
- Molibdênio (Mo): se adicionado em quantidades relativamente baixas (0,15-0,30%), os efeitos pronunciados deste elemento são: maior ductilidade e tenacidade; maior resistência à fluência a altas temperaturas; e maior endurecibilidade quando presente junto ao cromo.

Segundo Davis (2005), o aço AISI 8620 é extensivamente usado na fabricação de engrenagens industriais devido ao seu baixo custo. Este autor cita que a dureza na camada cementada neste aço pode atingir 58-60 HRC e o núcleo do material ficar entre 28-32 HRC.

Como algumas de suas características, o aço SAE 8620 possui média temperabilidade, boa resistência ao desgaste na camada endurecida por cementação, e um núcleo dúctil e tenaz. Este aço pode ser usado na indústria mecânica e automotiva para engrenagens de câmbio e diferencial, coroas, pinhões, terminais, setores, sem-fins de direção, eixos de comando de válvulas, cruzetas, pinos de pistão, castanhas para placas de tornos, etc. (VILLARES, 2017)

## 2.2 Mecanismo de difusão atômica

De acordo com Callister e Rethwisch (2015), este mecanismo pode ser entendido como um fenômeno de transporte de matéria por movimento atômico e isto pode ocorrer tanto no interior de um sólido específico quanto a partir de um líquido, um gás ou outra fase sólida. Tal fenômeno físico é responsável pela viabilidade de tratamentos termoquímicos em geral.

Os átomos presentes numa rede cristalina poderão se movimentar de um lugar para outro desta rede se atendidas determinadas condições: 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 e RETHWISCH, 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 9 (CALLISTER e RETHWISCH, 2015):

$$J = \frac{M}{A.t} = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (9)$$

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

Grande parte das situações práticas envolvendo difusão atômica ocorre no regime não estacionário, onde o fluxo difusional e o gradiente de concentração num ponto específico dentro do sólido variam com o tempo. Neste caso, tem-se a equação da segunda lei de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (10)$$

A segunda lei de Fick pode ser resolvida na prática se consideradas algumas hipóteses antes do início da difusão atômica (CALLISTER e RETHWISCH, 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.

Nesta condição o material sólido é considerado semi-infinito, ou seja, durante todo o processo de difusão os átomos não chegam até a outra extremidade do sólido. Baseado nas hipóteses anteriores, as condições de contorno são (CALLISTER e RETHWISCH, 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 (11) (HOSSEINI, 2012; CALLISTER e RETHWISCH, 2015):

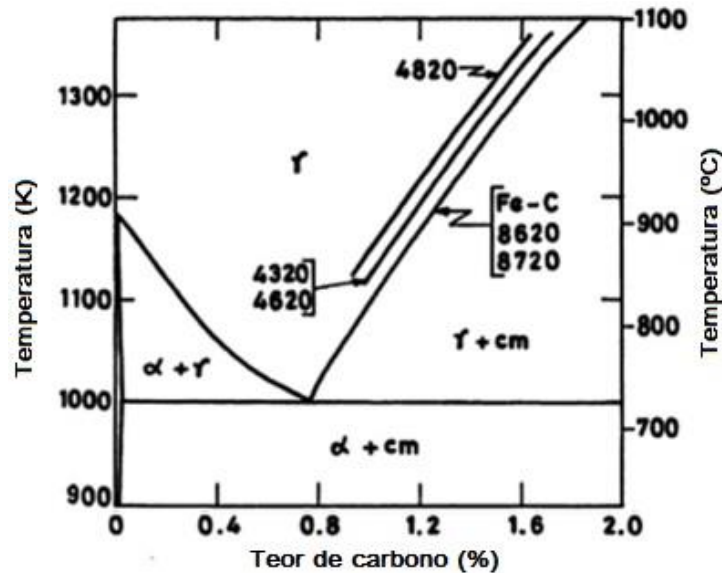
$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (11)$$

onde  $C_x$  indica a concentração numa profundidade  $x$  (metros) após um tempo  $t$  (segundos);  $C_0$  é a concentração inicial dos átomos no sólido; e  $C_s$  é a concentração constante na superfície do sólido;  $D$  é o coeficiente de difusão do carbono na austenita. O valor deste coeficiente na austenita do aço a  $900^\circ\text{C}$  é de  $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Hosseini (2012) considera que a solubilidade máxima de carbono na fase austenita (variável  $C_s$  na segunda lei de Fick) depende da temperatura de tratamento e da composição química do aço. Isto pode ser verificado na Fig. 3, onde se tem parte do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C

aplicado a alguns aços. No caso do aço AISI 8620, o autor sugere que no tratamento de cementação a 925°C tem-se que a concentração máxima de carbono na austenita é de 1,3%C, ou seja, isto representa o teor de carbono na superfície do sólido.

Figura 3 - Parte do diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C estando indicado o limite de solubilidade do carbono na fase austenita de alguns aços AISI em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de HOSSEINI e LI (2016).

A equação  $\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$  é a função erro de Gauss e tal função pode ser definida pela equação (12) onde  $x/2\sqrt{Dt}$  foi substituída pela variável  $z$ :

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (12)$$

Os parâmetros de concentração presentes na equação (11), 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 (CALLISTER e RETHWISCH, 2015).

Com relação ao parâmetro  $C_x$ , pode-se admitir que a concentração de carbono na camada cementada é controlada entre 0,7 e 1% para o percentual em peso (KRAUSS, 1990, *apud* LAMPMAN, 1991). Porém, tal 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) cita que alguma quantidade de austenita retida pode ser benéfica para melhorar a tenacidade da camada endurecida, mesmo que reduzindo um pouco a dureza superficial.

## 2.3 Tratamentos térmicos e termoquímicos

Existem dois diferentes grupos de tratamentos que podem ser aplicados aos materiais metálicos: os tratamentos térmicos e os tratamentos termoquímicos. O primeiro grupo altera as propriedades mecânicas ao longo de toda a seção da peça; enquanto que o segundo promove mudança na composição química, alterando as propriedades mecânicas do material apenas numa fina camada a partir da superfície para o interior da peça.

Hosseini e Li (2016) citam que os tratamentos termoquímicos mais usuais são: a cementação, nitretação, carbonitretação e a boretação. Estes tratamentos são comumente aplicados para endurecimento e aumento da resistência ao desgaste na superfície dos aços, mantendo-se o núcleo da peça dúctil e tenaz. Neste contexto, uma maior velocidade de difusão atômica do agente (ou elemento) endurecedor é favorecida a altas temperaturas e pelo tempo de exposição da peça metálica num dado meio químico rico neste agente que se difunde para o interior do material (CHIAVERINI, 2002).

### 2.3.1 Têmpera e Revenimento

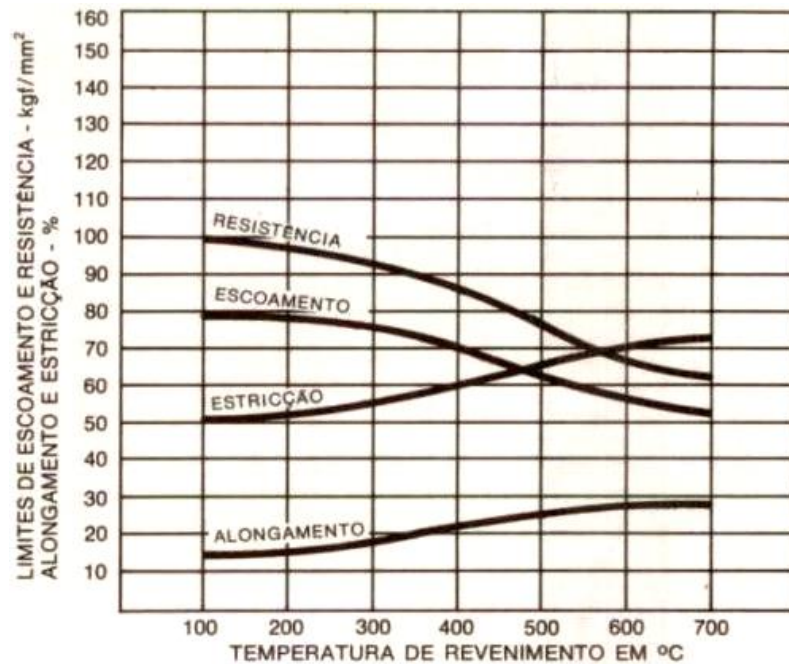
O tratamento térmico de têmpera consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização, que depende do teor de carbono do próprio aço. Deve-se manter nessa temperatura por um dado tempo e, então, seguir com o resfriamento brusco para se obter uma microestrutura martensítica. Tal microestrutura possibilita aumentos na dureza, na resistência à tração e na resistência ao desgaste da peça (RAKHIT, 2000; CHIAVERINI, 2002).

De acordo com Chiaverini (2002), o meio de resfriamento usado na têmpera depende da endurecibilidade do aço, da forma e das dimensões da peça. Os meios de resfriamento são líquidos (água, água contendo aditivos cáusticos e óleo de têmpera, p. ex.) ou os meios gasosos, tais como o ar e gases inertes (nitrogênio, hélio ou argônio). Para evitar deformações em peças de pequenas dimensões, o óleo é o meio mais recomendado (KOWSER, 2015).

O revenimento é um tratamento que usualmente sempre deve ser feito após a têmpera, a fim de promover o alívio das tensões geradas pela martensita. A microestrutura martensítica possui baixa ductilidade e alto nível de tensões residuais na rede cristalina, deixando a peça suscetível à formação de trincas (CHIAVERINI, 2002). Esse tratamento consiste basicamente em reaquecer a peça temperada até uma determinada temperatura abaixo da zona crítica, mantendo-a por um dado tempo e resfriando-a lentamente dentro do forno (RAKHIT, 2000).

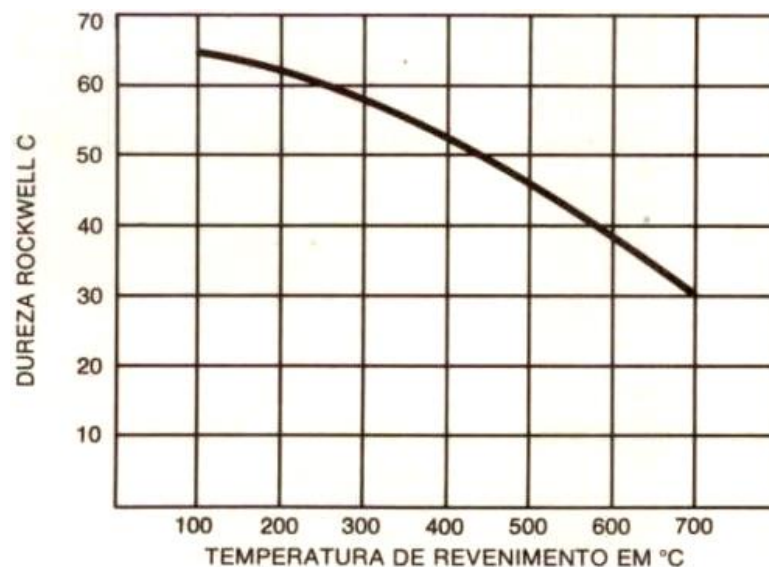
As Figuras 4 e 5 mostram efeitos do revenimento em algumas propriedades mecânicas no núcleo e na camada cementada em amostras de aço SAE 8620, respectivamente. Deve-se revenir o aço por 1 a 2 h para cada 25 mm de espessura da peça numa temperatura que resulte nas propriedades mecânicas desejadas (VILLARES, 2017). O revenido de aços cementados deve ser feito em temperatura reduzida (150-180°C) (COLPAERT, 2008; BEPARI, 2017).

Figura 4 - Diagrama de revenimento em amostras de aço SAE 8620 (relação  $L_0 = 4 \varnothing$ ): normalização a 910°C, cementação a 920°C por 4 h, têmpera em óleo a partir de 830°C e revenido por 2 h.



Fonte: VILLARES (2017)

Figura 5 - Diagrama de revenimento na camada cementada em amostras de aço SAE 8620 ( $\varnothing 22 \times 10$  mm): normalização a 910°C, cementação a 920°C (banho de sais), têmpera direta em óleo e revenido por 2 h.



Fonte: VILLARES (2017)

### 2.3.2 Cementação

Neste tratamento uma peça de aço deve estar envolta num meio químico rico no elemento endurecedor (o carbono) durante aquecimento no campo de fase da austenita (fase Fe- $\gamma$ ). A difusão de carbono atômico com o passar do tempo promove a formação de regiões, a partir da superfície para o interior da peça, com maior teor de carbono em relação ao núcleo no material. A profundidade de penetração do carbono no aço depende da temperatura (no geral entre 790 a 985°C para cementação de engrenagens), do tempo de manutenção nesta temperatura e da composição química do agente carbonetante (DAVIS, 2005).

O tratamento subsequente de têmpera permite endurecer a peça de aço numa fina camada abaixo da superfície, devido à formação de martensita na microestrutura e ao passo que se forma uma microestrutura ferrítica-perlítica no núcleo da peça (HOSSEINI e LI, 2016). Uma posterior etapa de revenimento possibilitará se obter uma faixa de dureza na superfície da peça. Ao final teremos como características alta dureza e boa resistência ao desgaste e à fadiga na superfície de peças cementadas, combinadas com um núcleo dúctil e tenaz da peça.

Este tratamento termoquímico pode ser executado por meio dos seguintes métodos (DAVIS, 2002; HOSSEINI e LI, 2016): cementação sólida; gasosa; a plasma (íon); a vácuo; e a cementação líquida em banho de sais.

Davis (2005) considera que para o tratamento de cementação devem ser usados aços que contenham no máximo 0,30% C (% peso). De acordo com Hosseini e Li (2016), os aços de baixo-carbono e de baixa-liga endurecidos por cementação possuem teores em torno de 0,2%C (% peso) enquanto que os teores de carbono na camada cementada podem ser fixados entre 0,8-1,0% C (% peso). No caso específico de aços baixa-liga, admite-se que a cementação possa aumentar o teor de carbono até 0,40% (% peso) para uma têmpera em óleo com manutenção de apreciável ductilidade no núcleo (CHIAVERINI, 2002).

Em uma pesquisa feita com 800 empresas nos EUA e no Canadá, cerca de 70% delas ofereciam serviços de cementação dos quais (HOSSEINI e LI, 2016):

- 48% ofertavam a cementação gasosa;
- 19% ofertavam a cementação sólida;
- 17% ofertavam a cementação líquida (banho de sais fundidos);
- 2% ofertavam cementação a vácuo (baixo vácuo e pressões parciais de gás hidrocarboneto);
- 1% ofertava a cementação a plasma (íon).

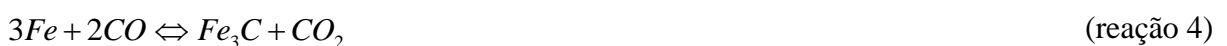
### 2.3.2.1 Cementação Sólida

A cementação sólida é o tratamento termoquímico mais antigo, sendo aplicado em temperaturas na faixa de 815-1095°C para serem obtidas nos aços ( $\approx 0,2\%C$ ) camadas endurecidas com profundidades de 125-1525  $\mu m$  (0,125-1,525 mm) e dureza de 50-63 HRC. Hosseini e Li (2016) destacam que as características deste tratamento são: uso de equipamentos de baixo custo; e dificuldade para um controle rigoroso da profundidade da camada endurecida em comparação aos outros métodos. Na cementação sólida é praticamente impossível ajustar o potencial químico do carbono durante o tratamento (COLPAERT, 2008).

#### *Reações químicas na cementação*

O mecanismo da cementação em caixa é basicamente o seguinte (CHIAVERINI, 2002; HOSSEINI e LI, 2016):

- Quando atingidas altas temperaturas, o oxigênio contido na caixa metálica de cementação se combina com o carbono proveniente da mistura carbonetante produzindo dióxido de carbono (reação 1);
- O dióxido de carbono reage com os átomos de carbono presentes na caixa, gerando monóxido de carbono (reação 2). Este monóxido se decompõe em carbono atômico ( $C_{atom}$ ) e dióxido de carbono na superfície do aço (reação 3);
- O carbono atômico é rapidamente absorvido e se difunde para o interior do aço; e a fase cementita é formada logo abaixo da superfície (reação 4); então, cementita se dissocia na fase austenita e por consequência o átomo de carbono se difunde para o interior do metal.



Dentre as misturas carburizantes existentes, aquelas mais utilizadas possuem carvão vegetal aglomerado com uma substância ativadora (cerca de 5-20%) em sua composição. Hosseini e Li (2016) citam que os ativadores químicos mais comuns são: carbonato de sódio ( $Na_2CO_3$ ), carbonato de bário ( $BaCO_3$ ), carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ) e carbonato de potássio ( $K_2CO_3$ ). Pode-se adicionar até 20% de coque para aumentar a velocidade de transferência de calor, facilitando a obtenção de temperaturas mais uniformes (CHIAVERINI, 2002).

### *Equipamentos e montagem*

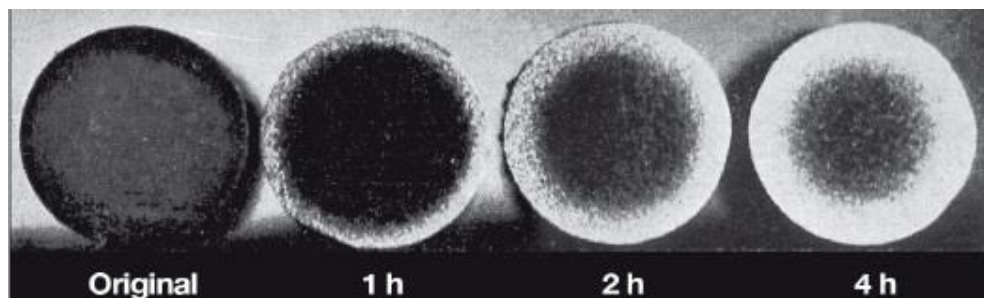
As caixas de metal usadas para agrupar a mistura carburizante e as peças devem ser espessas o suficiente para suportar o aquecimento prolongado durante a cementação. Essas caixas podem ser fabricadas de aço-carbono ou de uma liga Fe-Ni-Cr resistente ao calor. As caixas para cementação são amplamente fabricadas de aço-carbono, sendo esta uma solução mais econômica em relação às outras opções, apesar da sua vida útil ser relativamente curta (HOSSEINI e LI, 2016).

Hosseini e Li (2016) sugerem que as caixas para cementação não devem ser maiores do que o necessário, sendo projetadas apenas para suportar as peças e a mistura carbonetante. Se possível, a caixa deveria ser de formato retangular para promover um aquecimento mais uniforme no seu conteúdo. Estes autores também recomendam que antes de usar uma nova caixa, poder-se-ia fazer um tratamento prévio de cementação apenas com a mistura na caixa. Isto reduz a possibilidade da caixa ser mais cementada do que as peças numa primeira vez.

A camada da mistura carbonetante ao redor da peça deve ser espessa o suficiente para manter o seu potencial de carbono, porém essa camada não deve ser tão espessa a fim de retardar o aquecimento da peça durante a cementação. Recomenda-se que primeiro seja colocada uma camada do composto com cerca de 13-50 mm de profundidade no fundo da caixa. As peças a serem cementadas podem ser dispostas do seguinte modo: estar pelo menos 13 mm afastadas uma da outra e 25 mm distantes das paredes da caixa. Após isto, uma nova camada do composto deve ser depositada com a mesma profundidade da primeira. Outras camadas de peças podem ser preparadas na mesma caixa, respeitando-se a distância uma de 51-76 mm em relação à tampa. (HOSSEINI e LI, 2016)

Segundo Colpaert (2008), a análise por macrografia é bastante útil para constatar que a profundidade da camada cementada é dependente do tempo e também para se avaliar a homogeneidade desta camada. Tal fato foi analisado no resultado visto na Fig. 6, onde houve nítido aumento da espessura da camada em função do tempo.

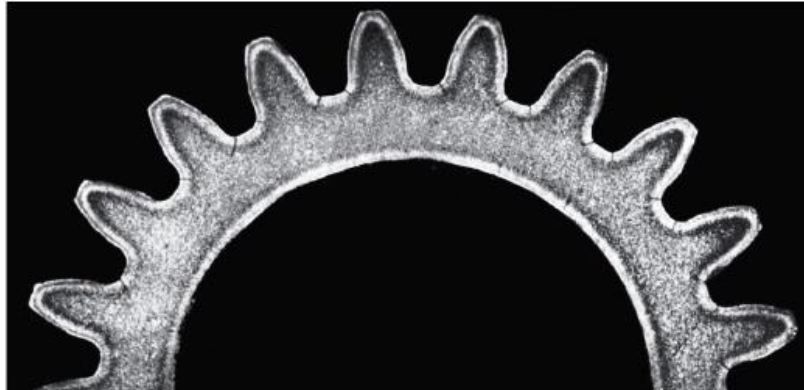
Figura 6 - Análise da cementação sólida em função do tempo; seções transversais atacadas por Nital.



Fonte: COLPAERT (2008)

Na Figura 7 é vista a macrografia de uma engrenagem, onde se avaliou a profundidade e homogeneidade da camada cementada. Esta análise revelou a presença de trincas nas raízes dos dentes. Colpaert (2008) relata que a cementação excessiva é um risco na cementação sólida, pois pode ocorrer a formação de cementita em rede e causar trincas na têmpera.

Figura 7 - Macrografia na seção transversal de uma engrenagem cementada, mostrando trincas visíveis nas raízes dos dentes. Ataque: Iodo.



Fonte: COLPAERT (2008)

Mazzo (2013) sugere que as profundidades recomendadas para camadas endurecidas por cementação podem ser relacionadas com o módulo normal de rodas dentadas. Na Tabela 4 são mostradas algumas destas relações e uma figura com um esquema simplificado da camada endurecida a partir da superfície do dente da engrenagem. Dependendo do tipo de material e do ciclo térmico aplicado, deve-se selecionar a escala Rockwell C (HRC) ou Vickers (HV) para as medições de dureza na camada cementada.

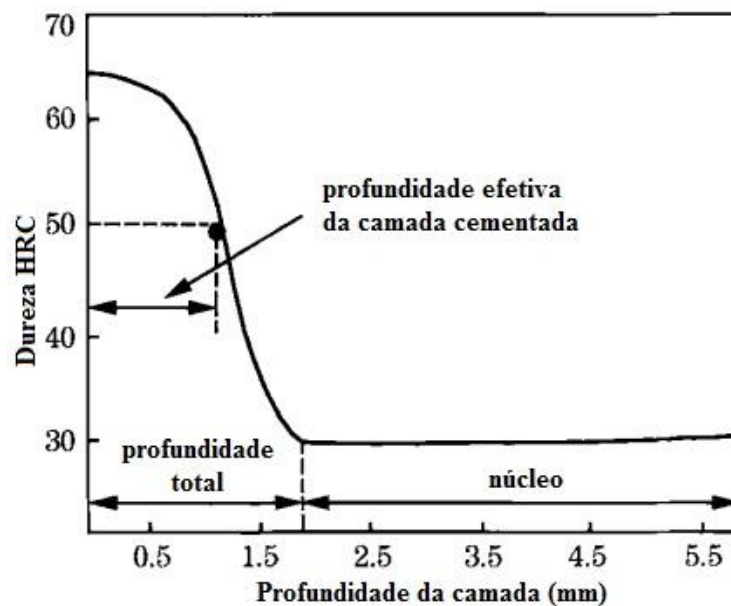
Tabela 4. Relação da profundidade de cementação com o módulo normal de rodas dentadas.

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

Fonte: Adaptado de MAZZO, (2013)

Na Figura 8 é mostrado o perfil de dureza de um aço endurecido por cementação, medido a partir da superfície para o interior do material, havendo clara distinção entre a profundidade efetiva e a profundidade total da camada. Hosseini e Li (2016) sugerem que uma camada endurecida por cementação deve apresentar valores de dureza acima de 50 HRC ( $\approx 550$  HV), sendo a profundidade efetiva desta camada tomada a partir deste valor.

Figura 8 - Gráfico esquemático para a profundidade efetiva da camada cementada em função da dureza.

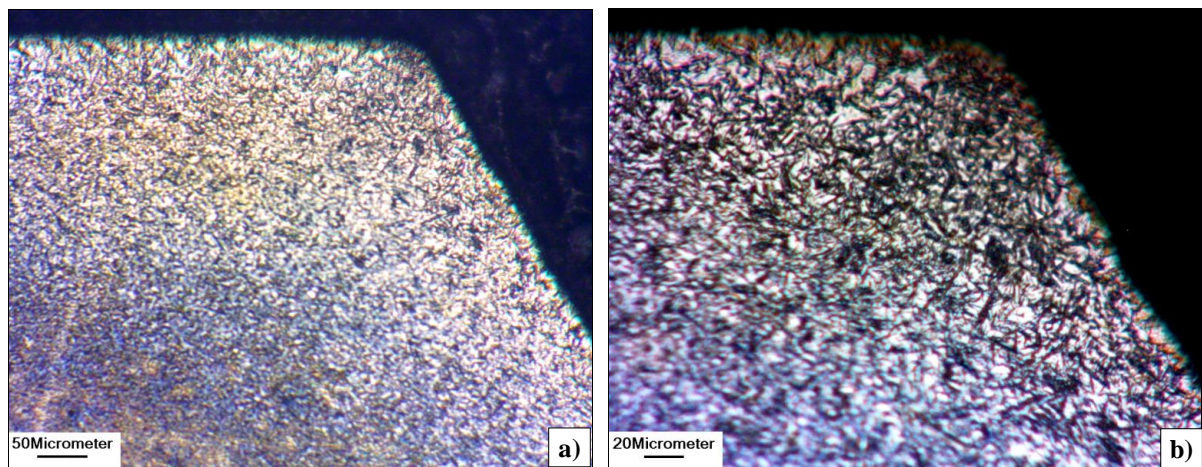


Fonte: Adaptado de HOSSEINI (2012)

Garcia (2017) realizou experimentos de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2 e largura de face de 12,50 mm) fabricadas de aço SAE 4320. Foram feitos cálculos teóricos baseados na segunda lei de Fick (regime não estacionário), que resultaram em três tempos de difusão do carbono neste aço a 900°C. Variou-se apenas o percentual de carbono na profundidade da camada endurecida fixada em 0,40 mm. Os resultados satisfatórios foram obtidos no tempo de 2,4 h, seguida de têmpera direta em óleo e revenimento. Os valores de dureza atingidos ficaram acima de 50 HRC na camada cementada para uma profundidade na faixa de 0,40-0,60 mm – específica para engrenagem módulo 2.

Na Figura 9 são exibidas micrografias numa mesma região da amostra-1 do estudo de Garcia (2017), referente ao experimento que gerou resultados satisfatórios. Houve formação de uma microestrutura ferrítica-perlítica no núcleo e de martensita junto à superfície do dente da engrenagem. Isto evidenciou que houve suficiente difusão de carbono para que, logo após a têmpera, fosse gerada martensita na camada cementada.

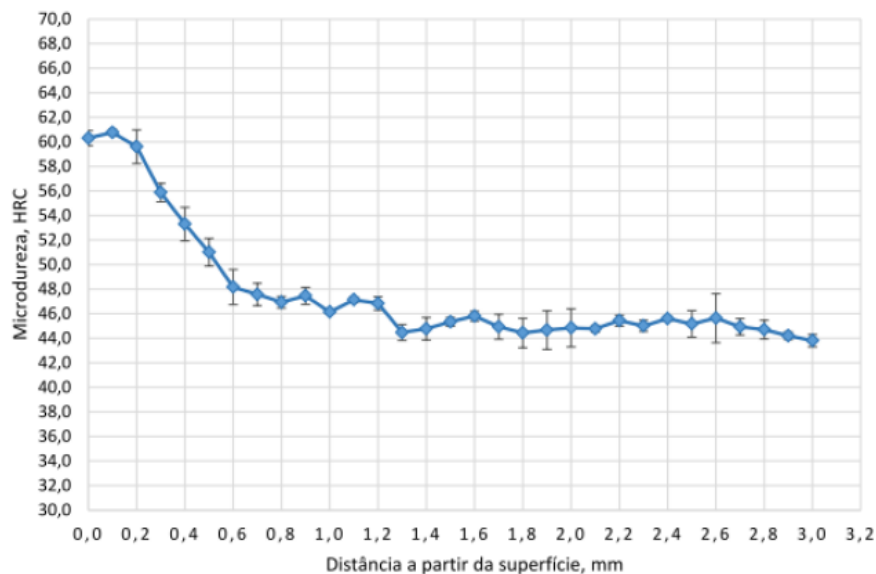
Figura 9 - Estudo de Garcia (2017), amostra-1 (cementação do aço SAE 4320 por 2,4 h a 900°C): a) perfil do dente cementado, aumento 200X; b) ampliação da região anterior, mostrando microestrutura martensítica na superfície do dente, aumento 400X. Ataque: Nital 2



Fonte: GARCIA (2017)

A Figura 10 mostra um perfil de microdureza feito através da camada cementada na amostra-1 do trabalho de Garcia (2017), onde se notou que a profundidade efetiva da camada cementada ficou em torno de 0,50 mm. Com isto, a profundidade atingida ficou na faixa de 0,40-0,60 mm específica para a cementação de engrenagens com módulo 2.

Figura 10 - Perfil de microdureza na amostra-1 na cementação aço SAE 4320 por 2,4 h a 900°C.

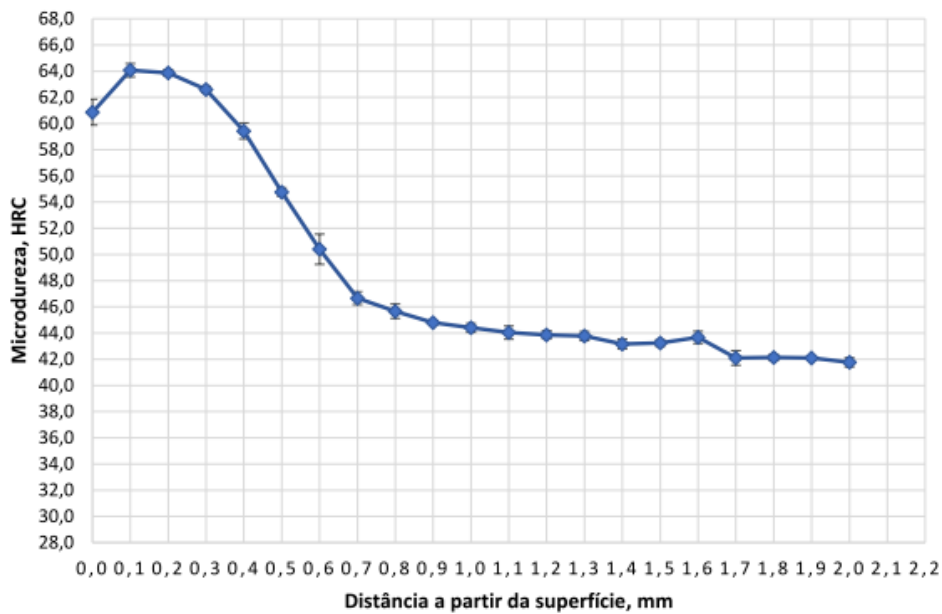


Fonte: GARCIA (2017)

Cardoso (2019) também realizou experimentos de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2), fabricadas de aços SAE 4320. Em seu trabalho constatou-se a reprodutibilidade dos bons resultados obtidos por Garcia (2017) e a sua aplicabilidade em engrenagens com diferente largura de face.

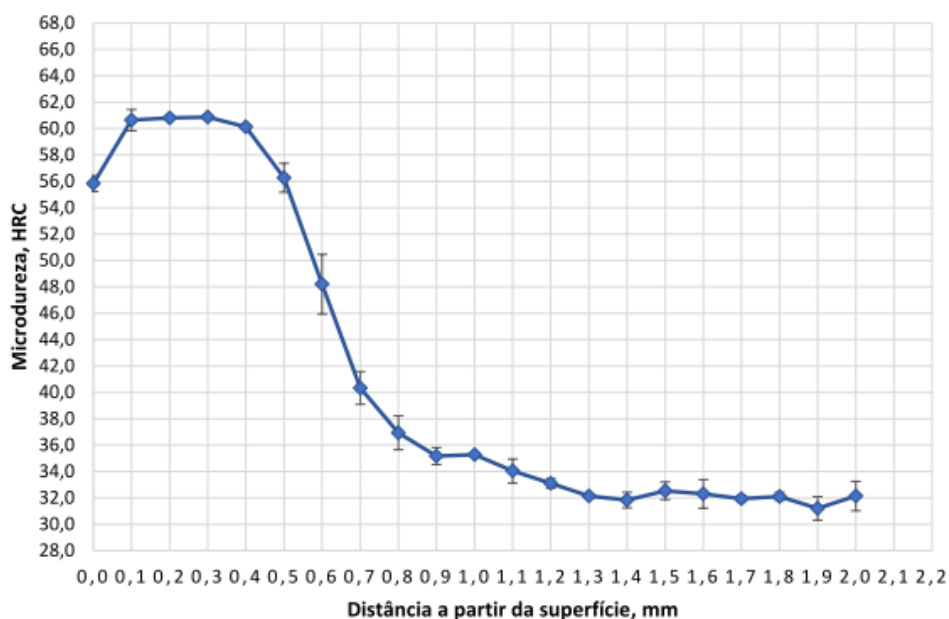
Nas Figuras 11 e 12 são mostrados perfis de dureza dos resultados obtidos no trabalho de Cardoso (2019), respectivamente para as amostras das engrenagens com largura de face 12,50 mm e 22,00 mm. Os valores obtidos de dureza na profundidade efetiva da camada cementada foram satisfatórios em ambos os casos, sendo atingidos valores acima de 50 HRC na faixa de 0,40-0,60 mm medida a partir do topo do dente. Houve aceitável reprodutibilidade dessa prática de cementação sólida a partir dos resultados obtidos nas engrenagens testadas.

Figura 11 - Perfil de microdureza na amostra-1 (largura de face = 12,50 mm), cementação aço SAE 4320.



Fonte: CARDOSO (2019)

Figura 12 - Perfil de microdureza na amostra-4 (largura de face = 22,00 mm), cementação aço SAE 4320.



Fonte: CARDOSO (2019)

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Na Tabela 5 é fornecida a composição química da barra de aço SAE 8620 com diâmetro de 50,80 mm, utilizada na fabricação das engrenagens cilíndricas de dentes retos. Trata-se de um aço ligado ao níquel, cromo e molibdênio, que pertence à série 86XX dos aços AISI-SAE. Este aço possui boas condições de temperabilidade, forjabilidade e soldabilidade, sendo também destinado à fabricação de peças cementadas (MKRAFT, 2019).

Tabela 5. Composição química do aço SAE 8620 (% peso), segundo dados do fabricante.

C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cr	Cu
0,19	0,76	0,26	0,010	0,014	0,47	0,18	0,52	0,06

Fonte: Radiação – Comércio de Aços Especiais Ltda.

Utilizou-se uma caixa fabricada de chapas de aço SAE 1020 nas dimensões de 100x100x170,0 mm e espessura de 3,0 mm no tratamento de cementação sólida. As especificações dos compostos químicos que fazem parte da mistura carburizante Cimentox (modelo FL CIMENTOX1000, marca Oxigen) usada para cementação são dadas na Tabela 6.

Tabela 6. Composição química (% peso) e registro CAS dos componentes da mistura carburizante usada na 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 usado 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. Na Tabela 7 são fornecidas algumas características físicas deste produto.

Tabela 7. Características físicas do óleo de têmpera South Oil Temp MO 32.

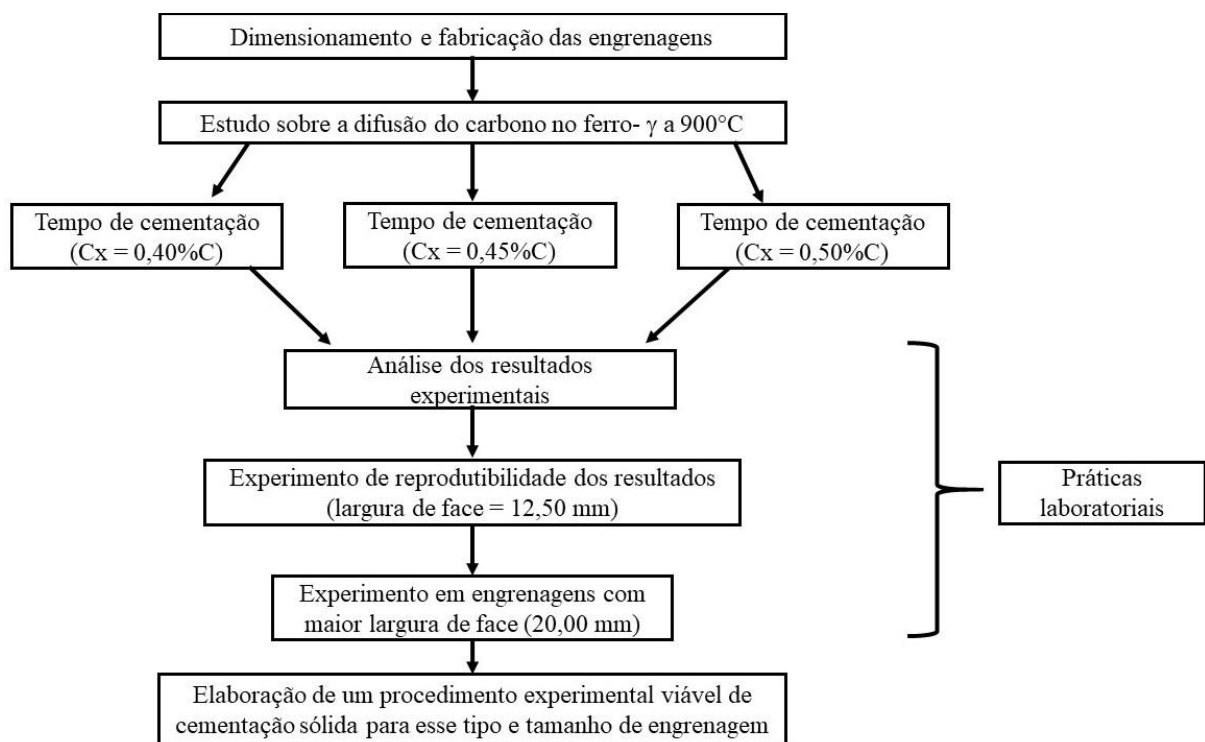
Viscosidades	South Oil Temp MO 32
Densidade	0,875
Viscosidade cSt 40°C	32,9
Viscosidade cSt 100°C	5,2
Ponto de combustão (°C)	205

Fonte: Indústria Química Rocha Ltda.

### 3.2 Métodos

Na Figura 13 é mostrado um organograma com as etapas que compõe a metodologia deste trabalho, desde a fabricação das engrenagens até a elaboração de um adequado procedimento de cementação sólida para este tipo e tamanho de engrenagem.

Figura 13 – Organograma com as etapas da metodologia utilizada neste trabalho.



Fonte: Autor (2021)

#### 3.2.1 Dimensionamento e fabricação das engrenagens

O dimensionamento das engrenagens foi realizado com base nas equações de Gieck (1996), devidamente apresentadas no item 2.1.1.1 deste trabalho (ver pág. 16). As engrenagens produzidas possuem 20 dentes, módulo 2, ângulo de pressão 20° - valor padrão

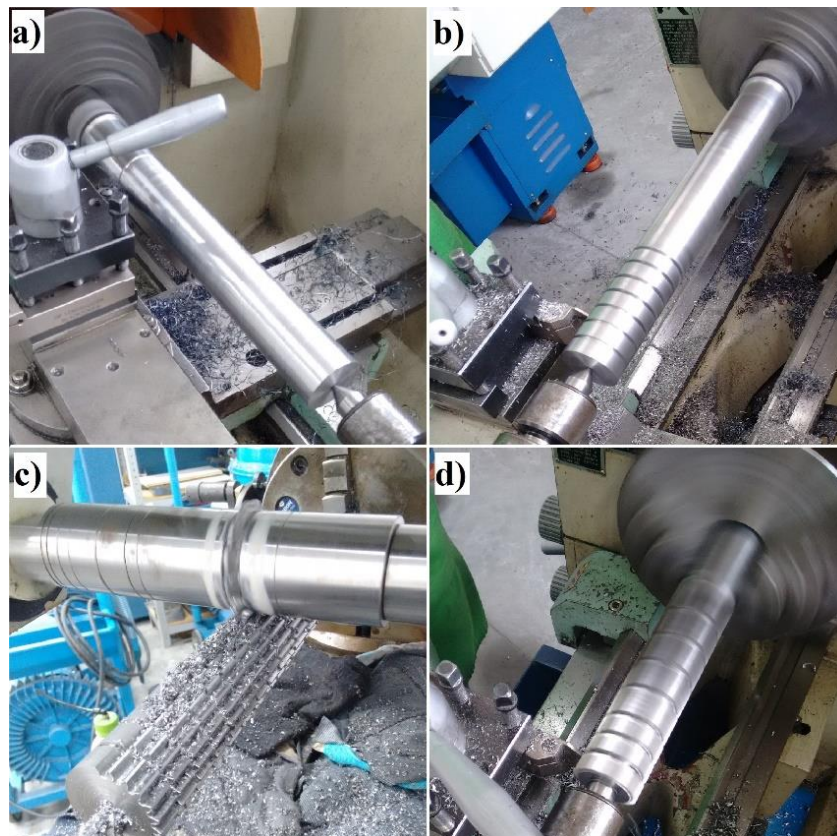
na fabricação destes elementos (NORTON, 2013) e espessuras de 12,50 mm e 20 mm. Nos Apêndices A e B são mostrados os desenhos técnicos das engrenagens fabricadas.

As engrenagens utilizadas nos experimentos de cementação sólida foram fabricadas no Laboratório de Usinagem do campus. Primeiramente foi usinada a barra de aço SAE 8620 até o diâmetro (externo) de 44,00 mm (ver Fig. 14a). Fez-se o procedimento técnico chamado de pré-sangramento com o auxílio de um bedame na largura de cada engrenagem (ver Fig. 14b).

O fresamento dos dentes foi realizado com uma fresa de perfil constante (módulo 2) e um aparelho divisor (ver Fig. 14c), sendo a profundidade de penetração da fresa de cerca de 4,33 mm. Utilizou-se um disco divisor com 20 furos, sendo assim a usinagem de cada dente se deu através de duas voltas completas no disco. Em seguida fez-se a furação e o corte das engrenagens: a furação foi efetuada com uma sequência de brocas (diâmetros de 10, 14, 16 e 18 mm); e o corte foi feito com um bedame (ver Fig. 14d). Os canais de chaveta foram executados na máquina de eletroerosão a fio.

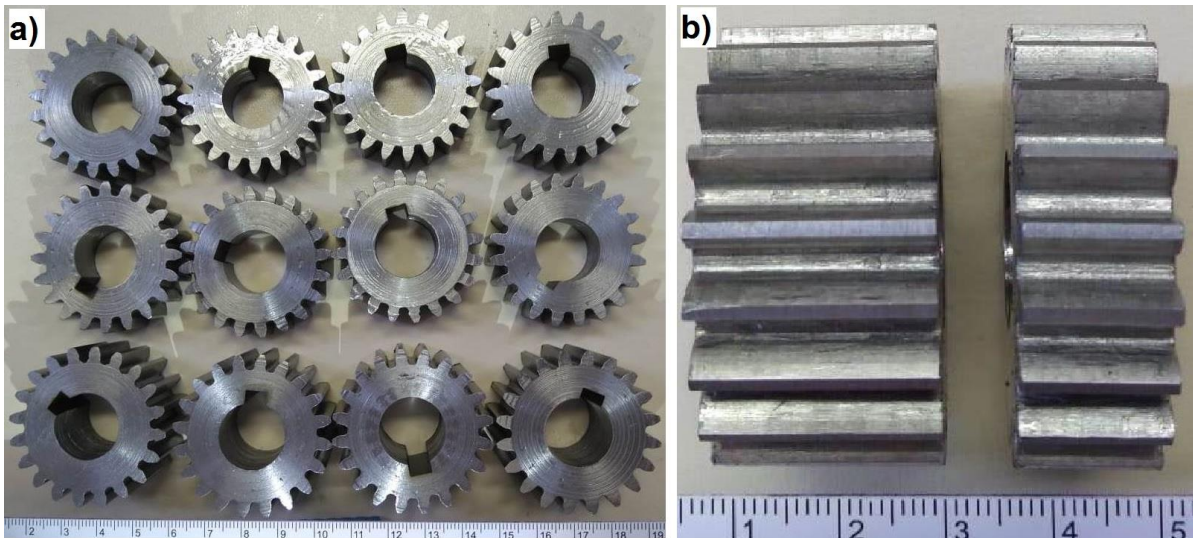
Na Figura 15 são mostradas todas as engrenagens de aço SAE 8620 fabricadas para os experimentos de cementação sólida (ver Fig. 15a) e uma vista com detalhe para a dimensão da largura de face para ambas as peças (ver Fig. 15b).

Figura 14 - Procedimentos de fabricação das engrenagens: a) torneamento para o diâmetro de 44,00 mm; b) pré-sangramento; c) fresamento dos dentes; d) corte com o bedame.



Fonte: Autor (2021)

Figura 15 - Engrenagens fabricadas para cementação: a) total de 12 peças; b) detalhe para a largura de face das engrenagens. Escala em milímetros.



Fonte: Autor (2021)

### 3.2.2 Cálculo do tempo para difusão do carbono

O estudo sobre a difusão do carbono no ferro- $\gamma$  a  $900^{\circ}\text{C}$  foi baseado na segunda lei de Fick (ver equação 11, p.20), sendo executados cálculos teóricos para se obter uma estimativa do tempo de difusão do carbono no aço, ou seja, do tempo de permanência das peças no forno durante o tratamento de cementação sólida.

Em todos os cálculos fixou-se o valor de 0,40 mm para a profundidade atingida na camada endurecida (variável  $x$ ). Mazzo (2013) considera que a profundidade da camada endurecida por cementação em rodas dentadas com módulo 2 varia de 0,40-0,60 mm (ver tabela 4, p.27). Devido a isto, optou-se por fixar tal profundidade no limite inferior.

Outros parâmetros mantidos nos cálculos foram os seguintes: 0,19% para o teor inicial de carbono ( $C_0$ ); 1,225% para a solubilidade máxima de carbono na austenita do aço SAE 8620 a  $900^{\circ}\text{C}$  ( $C_s$ ); e o coeficiente de difusão ( $D$ ) do carbono na austenita a  $900^{\circ}\text{C}$  foi de  $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Para o valor da concentração de carbono na profundidade  $x$  (variável  $C_x$ ) após um tempo  $t$  foram fixados nos cálculos os valores de 0,40%, 0,45%, 0,50% e 0,60% C. Gupta et al. (2015) cita que uma concentração em torno de 0,4% C é considerada típica na profundidade da camada cementada efetiva nos aços comuns.

O valor fixado neste trabalho para a solubilidade máxima de carbono na austenita do aço SAE 8620 a  $900^{\circ}\text{C}$  (variável  $C_s$ ) foi obtido no gráfico da Fig. 3 (ver p.21). Nesta figura há gráficos que indicam o limite de solubilidade do carbono na fase Fe- $\gamma$  em alguns aços. Os cálculos e os tempos obtidos nas condições citadas anteriormente são apresentados adiante.

– Estimativa do teor de carbono (% peso) na profundidade de 0,40 mm:  $C_x = 0,40\%C$

– Profundidade estimada para a camada endurecida (x): 0,40 mm =  $4 \times 10^{-4}$  m

Outras variáveis (% peso):  $C_o = 0,19\%C$ ;  $C_s = 1,225\%$

$D = 5,9 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (a 900°C)

$$\frac{0,40 - 0,19}{1,225 - 0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot t}}\right)$$

$$0,2029 = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

$$0,7971 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

Resolvendo por interpolação tem-se que:

Valores de z	erf (z)
0,90	0,7970
z	0,7971
0,95	0,8209

$$\frac{z - 0,90}{0,95 - 0,90} = \frac{0,7971 - 0,7970}{0,8209 - 0,7970} = 4,1841 \cdot 10^{-3}$$

$$z = 0,9002$$

$$\frac{82,3387}{\sqrt{t}} = 0,9002$$

$$t = 8366,2337 \text{ s} = 2\text{h}19\text{min}26\text{s}$$

– Estimativa do teor de carbono (% peso) na profundidade de 0,40 mm:  $C_x = 0,45\%C$

– Profundidade fixada para a camada endurecida (x): 0,40 mm =  $4 \times 10^{-4}$  m

Outras variáveis (% peso):  $C_o = 0,19\%C$ ;  $C_s = 1,225\%$

$D = 5,9 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (a 900°C)

$$\frac{0,45-0,19}{1,225-0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot t}}\right)$$

$$0,2512 = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

$$0,7488 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

Resolvendo por interpolação tem-se que:

Valores de z	erf (z)
0,80	0,7421
z	0,7488
0,85	0,7707

$$\frac{z-0,80}{0,85-0,80} = \frac{0,7488-0,7421}{0,7707-0,7421} = 0,2343$$

$$z = 0,8117$$

$$\frac{82,3387}{\sqrt{t}} = 0,8117$$

$$t = 102900366\text{s} = 2\text{h}51\text{min}30\text{s}$$

– Estimativa do teor de carbono (% peso) na profundidade de 0,40 mm:  $C_x = 0,50\%C$

– Profundidade fixada para a camada endurecida (x): 0,40 mm =  $4 \times 10^{-4}$  m

Outras variáveis (% peso):  $C_o = 0,19\%C$ ;  $C_s = 1,225\%$

$D = 5,9 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (a 900°C)

$$\frac{0,50-0,19}{1,225-0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot t}}\right)$$

$$0,2995 = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

$$0,7005 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

Resolvendo por interpolação tem-se que:

Valores de z	erf (z)
0,70	0,6778
z	0,7005
0,75	0,7112

$$\frac{z-0,70}{0,75-0,70} = \frac{0,7005-0,6778}{0,7112-0,6778} = 0,7339$$

$$z = 0,7339$$

$$\frac{82,3387}{\sqrt{t}} = 0,7339$$

$$t = 12587,3479 \text{ s} = 3 \text{ h } 29 \text{ min } 47 \text{ s}$$

– Estimativa do teor de carbono (% peso) na profundidade de 0,40 mm:  $C_x = 0,60\% \text{ C}$

– Profundidade fixada para a camada endurecida (x):  $0,40 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$

Outras variáveis (% peso):  $C_o = 0,19\% \text{ C}$ ;  $C_s = 1,225\%$

$D = 5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (a  $900^\circ \text{C}$ )

$$\frac{0,60-0,19}{1,225-0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot t}}\right)$$

$$0,3961 = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

$$0,6039 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,3387}{\sqrt{t}}\right)$$

Não foi necessário fazer interpolação, pois o valor de 0,6039 consta na tabela de valores da função erro da fonte consultada (CALLISTER e RETHWISCH, p.110, 2015).

$$\frac{82,3387}{\sqrt{t}} = 0,60$$

$$t = 188323931s$$

$$t = 5h14min$$

### 3.2.3 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico

De início foram usadas as engrenagens com largura de face de 12,50 mm nos experimentos de cementação sólida, a fim de selecionar a melhor condição testada para os valores de  $C_x$  (0,40%C; 0,45%C; e 0,50%C dados no item 3.2.2). Colocou-se uma camada da mistura carbonetante com cerca de 20 mm no fundo de uma caixa de aço SAE 1020 (dimensões 100,0×100,0×170,0 mm e espessura 3,0 mm); sobre esta camada as peças foram alojadas na posição horizontal, ficando espaçadas por cerca de 20 mm entre si e entre as paredes da caixa – sempre duas peças por vez.

Em seguida, as peças foram cobertas com outra camada dessa mistura também com cerca de 20 mm. A caixa não era hermeticamente fechada, sendo tampada com uma tampa do mesmo material e o conjunto da caixa aquecido até 900°C e a partir marcou-se o início do tempo de cementação. Na Fig. 16 são mostradas peças colocadas sobre a primeira camada da mistura no fundo da caixa de cementação.

Figura 16 - Engrenagens colocadas sobre a primeira camada da mistura no fundo da caixa de cementação.



Fonte: Autor (2021)

Utilizou-se o mesmo forno de tratamento térmico da marca QUIMIOS em todas as práticas de cementação, que está localizado no Laboratório de Soldagem do campus. O tempo estimado dentro do forno possibilitou a difusão atômica do carbono para o interior das peças. Logo que finalizado este período, e imediatamente após a remoção das peças da caixa, fez-se a têmpera direta em óleo com movimentos suaves para um resfriamento uniforme. Cada engrenagem cementada foi temperada em latas individuais contendo cerca de 3,6 L de óleo de têmpera. Os procedimentos anteriormente citados também foram aplicados nos testes feitos nas engrenagens mais robustas, ou seja, aquelas com largura de face de 20,00 mm.

As peças foram devidamente limpas ao término das etapas de cementação e têmpera direta para, então, serem submetidas a um revenimento no dia seguinte. Este tratamento foi feito na estufa de secagem da marca SOLAB (modelo SL-100) no Laboratório de Ensaios e de Materiais do campus, sendo executado para duas condições: engrenagens com largura de face de 12,50 mm revenidas a 180°C por 1h; e aquelas com largura de face de 20,00 mm revenidas a 180°C por 1h30min em função da maior dimensão. O revenimento brando visou aliviar as tensões residuais geradas na martensita formada na camada endurecida nas peças cementadas e para não reduzir tanto os níveis de dureza atingidos nesta camada.

### 3.2.4 Práticas Laboratoriais

No Laboratório de Ensaios e de Materiais do campus foram realizadas as análises de macrografia, metalografia com microscopia óptica e os ensaios de dureza, sendo executadas basicamente as seguintes práticas experimentais:

– Corte de uma amostra da barra na serra-fita (setor de Usinagem), e corte reduzido dessa amostra em máquina policorte para caracterização microestrutural e ensaio de dureza.

- Após a cementação fez-se o corte de amostras dos dentes das engrenagens para macrografia e metalografia, embutimento a quente destas em baquelite a 230°C por 20 min (pressão de cerca de 125 kgf/cm<sup>2</sup> na embutidora metalográfica da marca Fortel e modelo 30).
- Na Tabela 8 é mostrada a nomenclatura usada para identificação das amostras removidas das engrenagens cementadas, que foram analisadas neste estudo. Para cada par de amostras há um determinado valor da variável  $C_x$  (estimativa do teor de carbono numa dada profundidade) e o valor da largura de face da engrenagem. Também é apresentada a classificação em relação à sequência de experimentos (iniciais e de reprodutibilidade).
- Lixamento das amostras em lixadeira usando lixas d'água para metais na sequência de granulometria 80, 120, 220, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200.
- Polimento com suspensão de alumina 1,0  $\mu\text{m}$ , e posterior ataque químico com imersão a frio em Nital 3% por 4s.
- Uso do estereoscópio (marca ZEISS, modelo Stemi 2000-C) para obtenção de fotos com aumento de 6,50X no contorno dos dentes das engrenagens.
- 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 obter perfis de microdureza na escala Rockwell C (HRC) com carga de 300 gf por 10 s nas amostras removidas das engrenagens cementadas.
- As medições de microdureza foram feitas junto à superfície a partir do topo para o interior do dente de cada engrenagem cementada até uma profundidade de 2,0 mm. A Fig. 17 mostra um esquema com indicação dos locais de medição de dureza a partir da superfície dos dentes cementados. A distância entre cada indentação foi de 0,10 mm (100  $\mu\text{m}$ ), sendo feitas três medições em cada seção e, então, das quais se obteve a média e o desvio-padrão para a configuração dos perfis de microdureza.

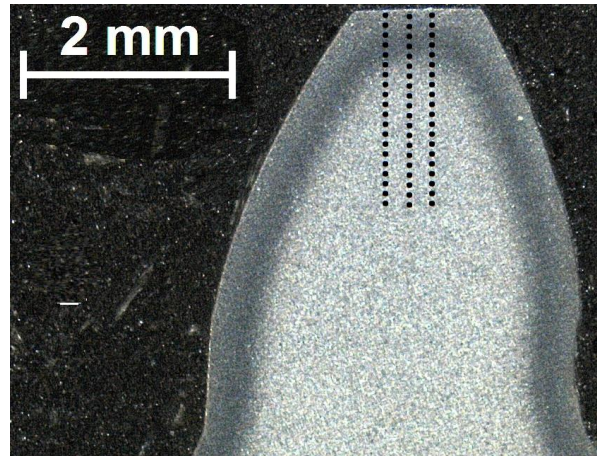
**Nota técnica:**

Utilizou-se a carga de 300 gf (grama-força), pois esta proporcionou um contorno retilíneo na impressão deixada pelo penetrador. Cargas menores do que 300 gf podem gerar alguma recuperação elástica no material metálico, dificultando a medida real das diagonais na impressão deixada pelo penetrador Vickers (SOUZA, 1982).

Tabela 8. Nomenclatura para as amostras removidas das engrenagens cementadas e analisadas nesse estudo.

Amostras	Cx (%C)	Largura de face (mm)	Classificação
Amostras 1 e 2	0,40	12,50	experimentos iniciais
Amostras 3 e 4	0,45		
Amostras 5 e 6	0,50		
Amostras 7 e 8	0,45	20,00	experimentos de reprodutibilidade
Amostras 9 e 10	0,40		
Amostras 11 e 12	0,40		

Figura 17 - Ilustração esquemática com os locais de medição de microdureza nos dentes das engrenagens cementadas (ver linhas pontilhadas).



Fonte: Autor (2021)

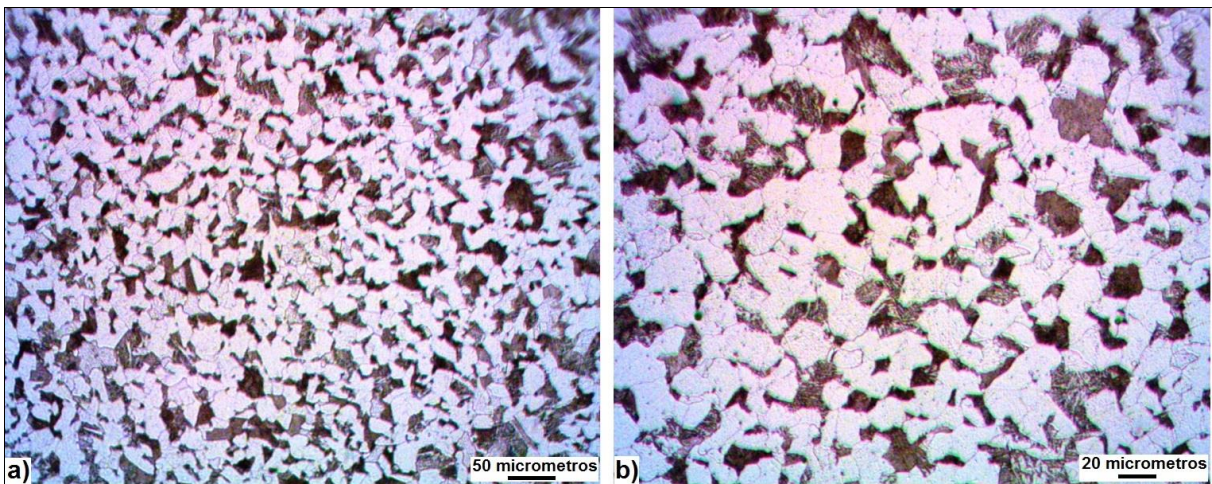
## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do aço SAE 8620

Na Figura 18 são apresentadas micrografias do aço SAE 8620 usado neste trabalho. A microestrutura é composta basicamente por grãos de ferrita (coloração clara) e perlita (coloração escura, e maior teor de carbono), além de uma fina dispersão de carbonetos na matriz. Notou-se que os carbonetos aparecem mais agrupados junto aos grãos de perlita.

Segundo Colpaert (2008), alguns elementos químicos têm alta afinidade pelo carbono e podem formar carbonetos estáveis no aço, tais como: cromo, vanádio, titânio, nióbio e molibdênio. Neste caso, possivelmente houve formação de carbonetos de cromo e molibdênio porque estes elementos estão presentes na composição química deste aço.

Figura 18 - Micrografia do aço SAE 8620 deste trabalho: a) presença de grãos de ferrita (fase clara), grãos de perlita (fase escura), aumento 200X; b) Ampliação da região anterior, destacando uma fina dispersão de carbonetos na matriz de ferrita e perlita, aumento 400X. Ataque nital 3%.



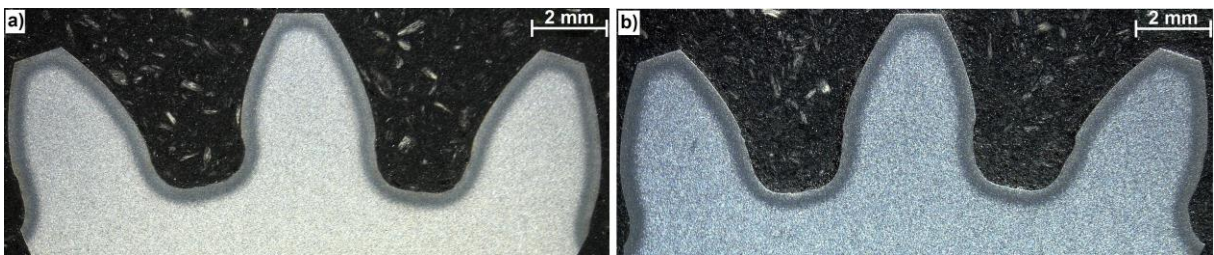
Fonte: Autor (2021)

No Laboratório de Ensaios e Materiais do campus foram executados ensaios de dureza na escala Rockwell B (HRB) numa amostra retirada da barra de aço SAE 8620. A medida de dureza calculada para cinco medições, após ajustes no equipamento, foi de  $90,3 \pm 1,0$  HRB. Apenas para fins de comparação, este valor corresponde a aproximadamente 183 HB (dureza na escala Brinell).

## 4.2 Análise macrográfica – verificação preliminar

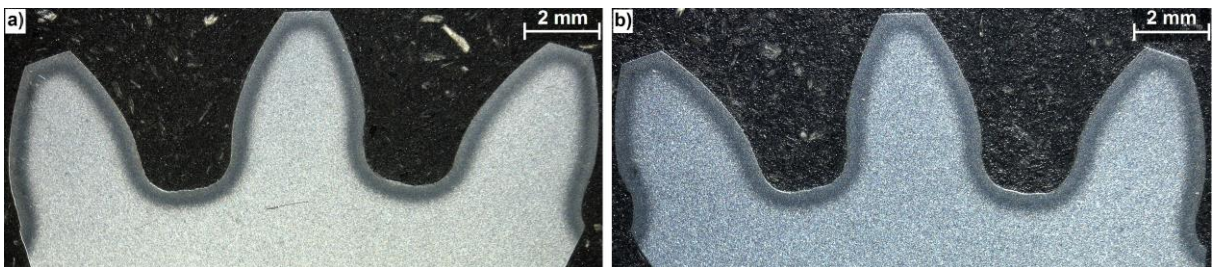
As macrografias apresentada nas Figuras 19, 20 e 21 foram obtidas na cementação das engrenagens com largura de face 12,50 mm para as condições: variável  $C_x = 0,40\%C$  (nas amostras 1 e 2,  $t = 2h19min$ );  $C_x = 0,45\%C$  (amostras 3 e 4,  $t = 2h51min$ ); e  $C_x = 0,50\%C$  (amostras 5 e 6,  $t = 3h29min$ ), respectivamente. Percebe-se nestas imagens que se formou uma região contínua e homogênea abaixo da superfície e ao longo do contorno dos dentes. Tal fato provavelmente foi influenciado pela difusão de carbono atômico para o interior das peças durante a cementação, seguindo-se a aplicação de têmpera direta em óleo para formação de uma camada endurecida nesta região.

Figura 19 - Macrografias na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  e cementação sólida por 2h19min a 900°C: a) amostra-1; b) amostra-2. Ataque nital 3%.



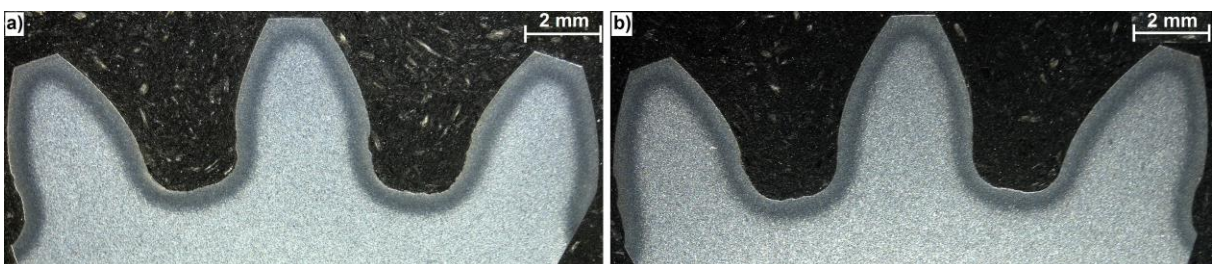
Fonte: Autor (2021))

Figura 20 - Macrografias na condição da variável  $C_x = 0,45\%C$  e cementação sólida por 2h51min a 900°C: a) amostra-3; b) amostra-4. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 21 - Macrografias na condição da variável  $C_x = 0,50\%C$  e cementação sólida por 3h29min a 900°C: a) amostra-5; b) amostra-6. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Davis (2005) considera que a homogeneidade na profundidade de camadas cementadas é um fator bastante relevante, pois a vida útil da engrenagem será afetada se houver regiões muito espessas ou estreitas. No caso de uma penetração insuficiente de carbono na base do dente, pode haver uma falha prematura em serviço, e com uma penetração excessiva de carbono na ponta do dente também poderá fragilizar a peça.

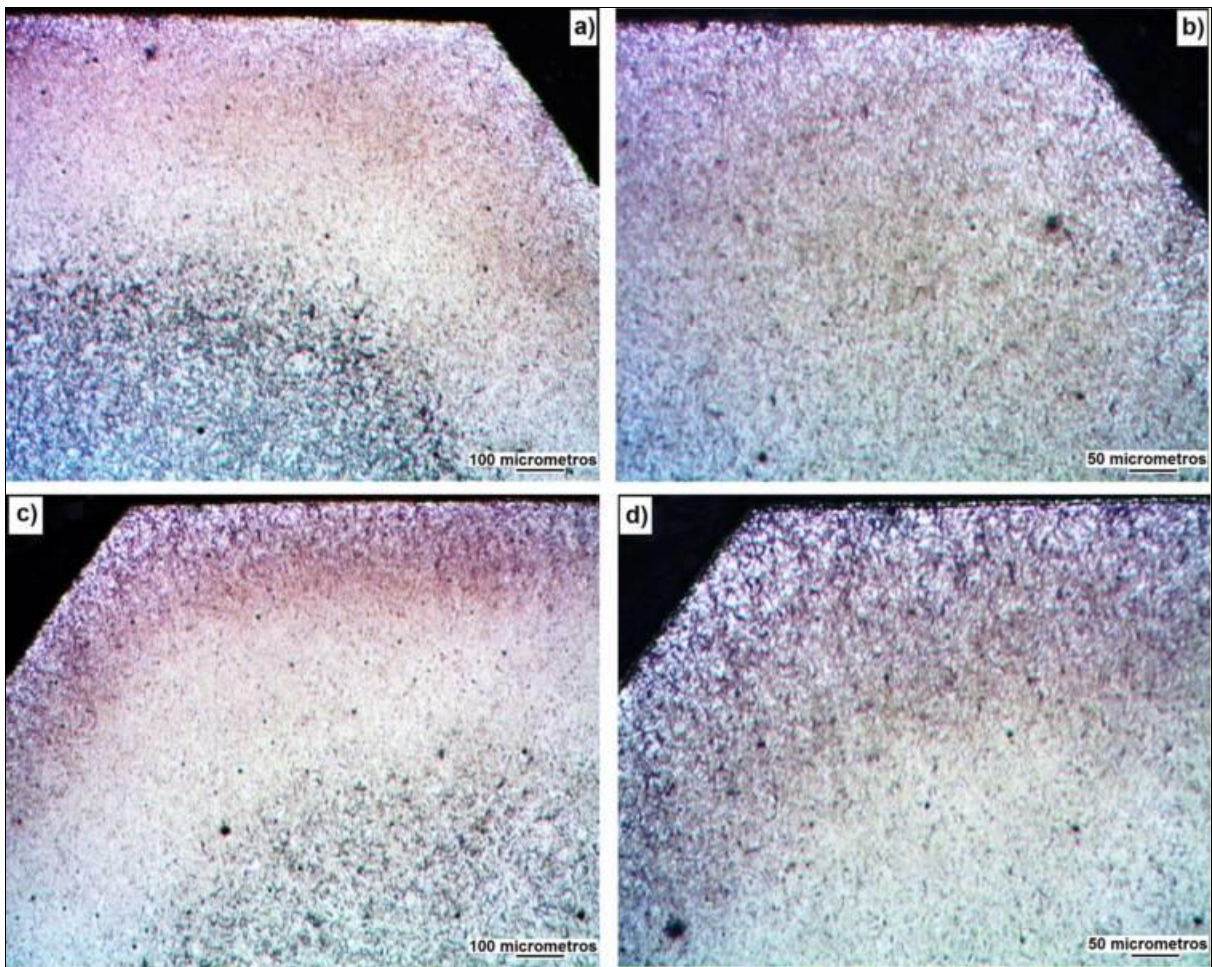
### **4.3 Análise metalográfica – verificação preliminar**

As Figuras 22 e 23 apresentam micrografias similares para as amostras 1 e 2 feitas no topo dos dentes das peças cementadas por 2h19min a 900°C (condição de  $C_x = 0,40\%C$ ). Nas micrografias das Fig. 22a e 22c percebe-se a formação de três regiões distintas: a primeira junto à superfície, uma zona de transição logo abaixo desta e a terceira região já no núcleo do dente. Nas Fig. 22b e 22d destaca-se a formação de uma microestrutura homogênea junto à superfície dos dentes.

Na Figura 23 são mostradas micrografias de maior ampliação das regiões vistas na Fig. 22, onde nota-se a formação de uma microestrutura martensítica contendo maior proporção de regiões claras dispersas na matriz próximo à superfície dos dentes. Tais áreas claras podem conter algum percentual de austenita retida. Pode-se dizer que a presença de martensita numa região contínua abaixo do perfil dos dentes foi resultado da têmpera direta em óleo, evidenciando que houve suficiente difusão de carbono para o interior do material para os parâmetros adotados no experimento de cementação.

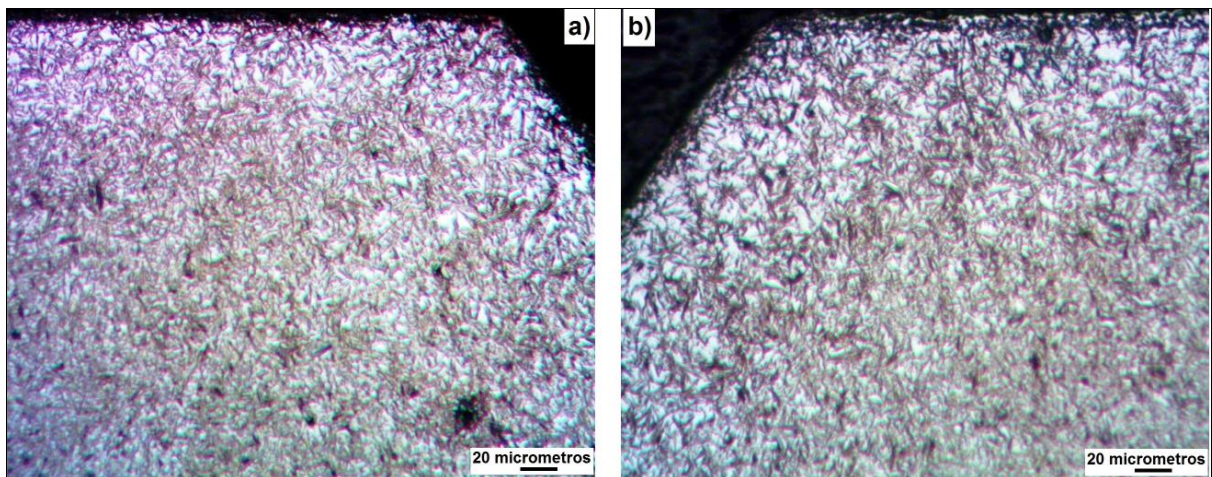
As micrografias nas Fig. 24 e 25 se referem às amostras 3 e 4, que foram removidas de um par de peças cementadas por 2h51min a 900°C (condição de  $C_x = 0,45\%C$ ). E nas Fig. 26 e 27 são mostradas micrografias das amostras 5 e 6, removidas de peças cementadas por 3h29min (condição de  $C_x = 0,50\%C$ ). A análise metalográfica das amostras nestas duas condições apresentou resultado similar àquele citado anteriormente nas Fig. 22 e 23. Igualmente se formou uma microestrutura martensítica logo abaixo da superfície no contorno dos dentes, onde também se notou a presença de uma maior concentração de regiões claras dispersas na matriz em comparação à região da zona de transição próxima ao núcleo do dente. Nas micrografias de maior ampliação também ficou evidente essa distribuição de regiões claras na microestrutura de martensita (ver Fig. 25 e 27).

Figura 22 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para  $C_x = 0,40\%C$  (cementação por 2h19min a  $900^\circ C$ ): a) amostra-1, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-2, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%.



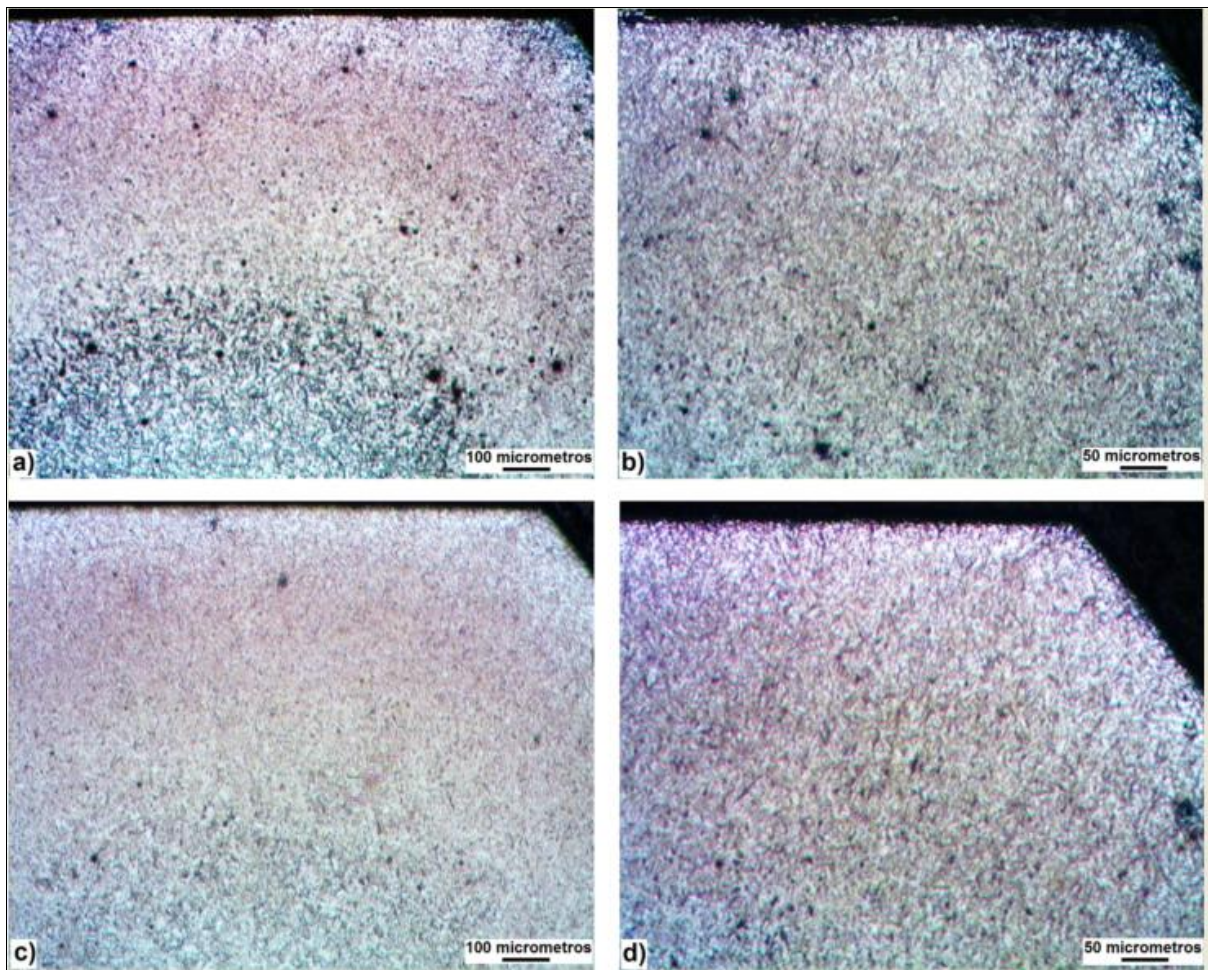
Fonte: Autor (2021)

Figura 23 - Micrografias no topo do dente na condição de  $C_x = 0,40\%C$  (ampliação das regiões na Fig. 22): a) amostra-1; b) amostra-2. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X, ataque nital 3%.



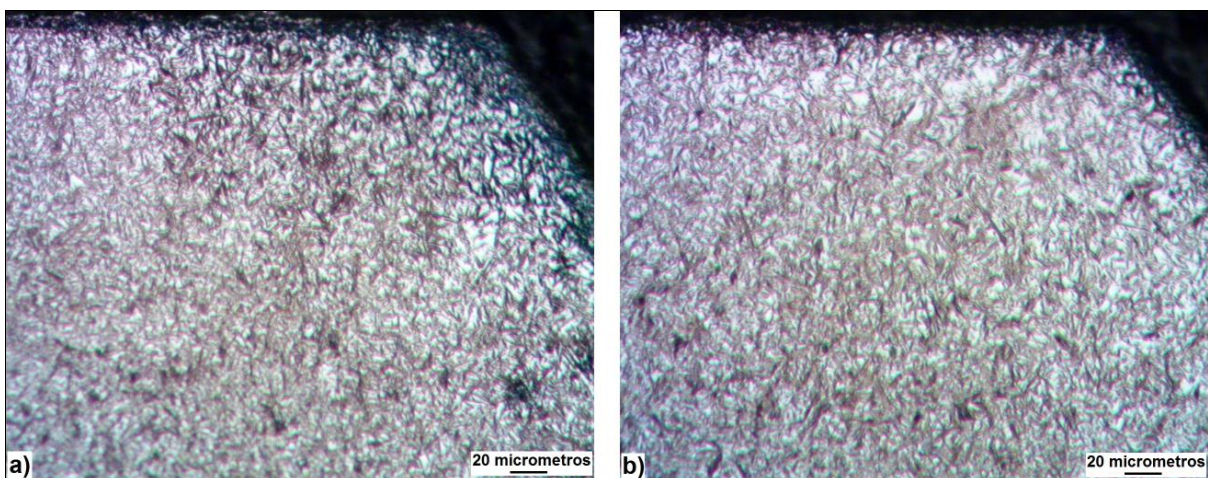
Fonte: Autor (2021)

Figura 24 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para  $C_x = 0,45\%C$  (cementação por 2h51min a  $900^\circ C$ ): a) amostra-3, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-4, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%.



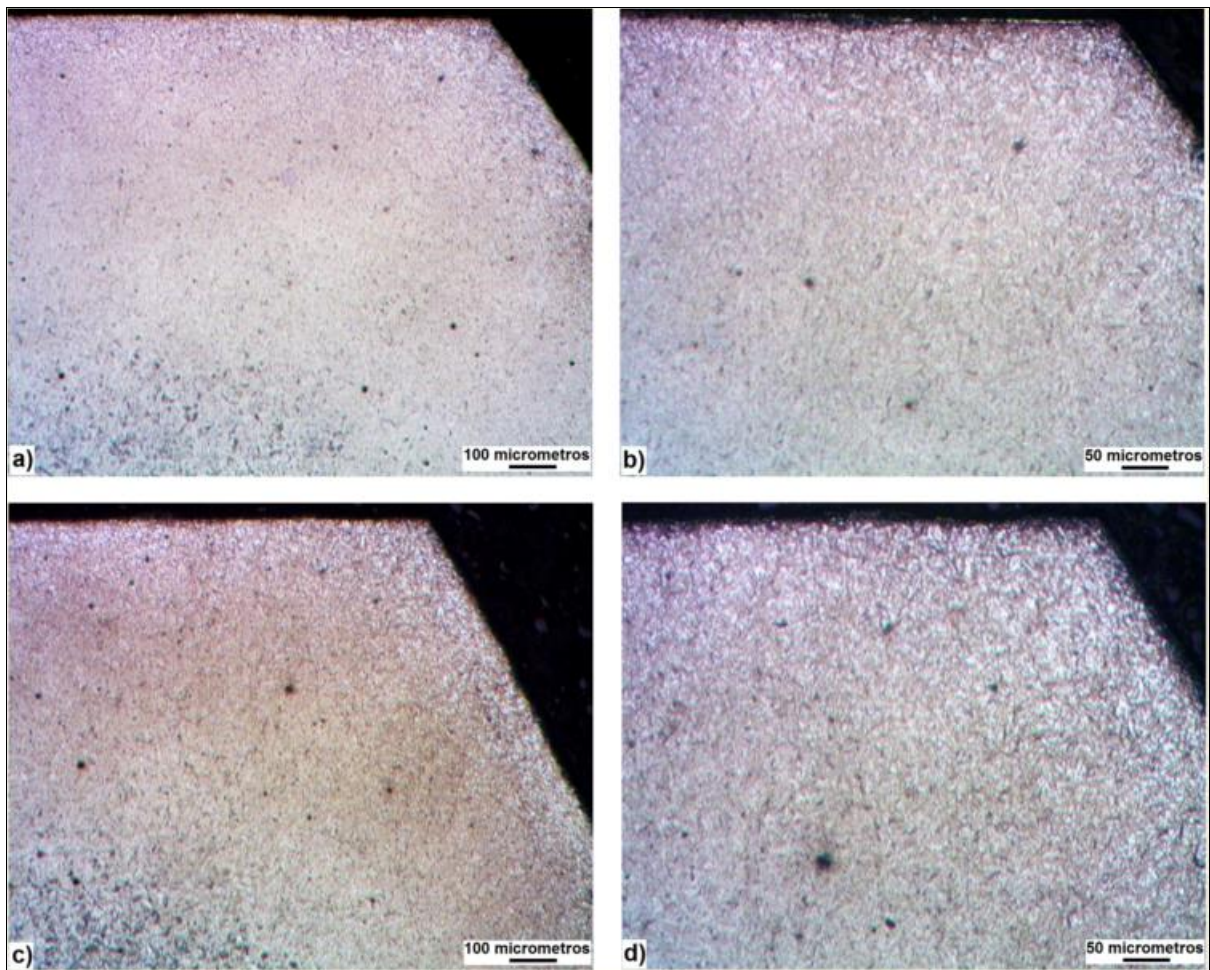
Fonte: Autor (2021)

Figura 25 - Micrografias no topo do dente na condição de  $C_x = 0,45\%C$  (ampliação das regiões na Fig. 24): a) amostra-3; b) amostra-4. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X. Ataque nital 3%.



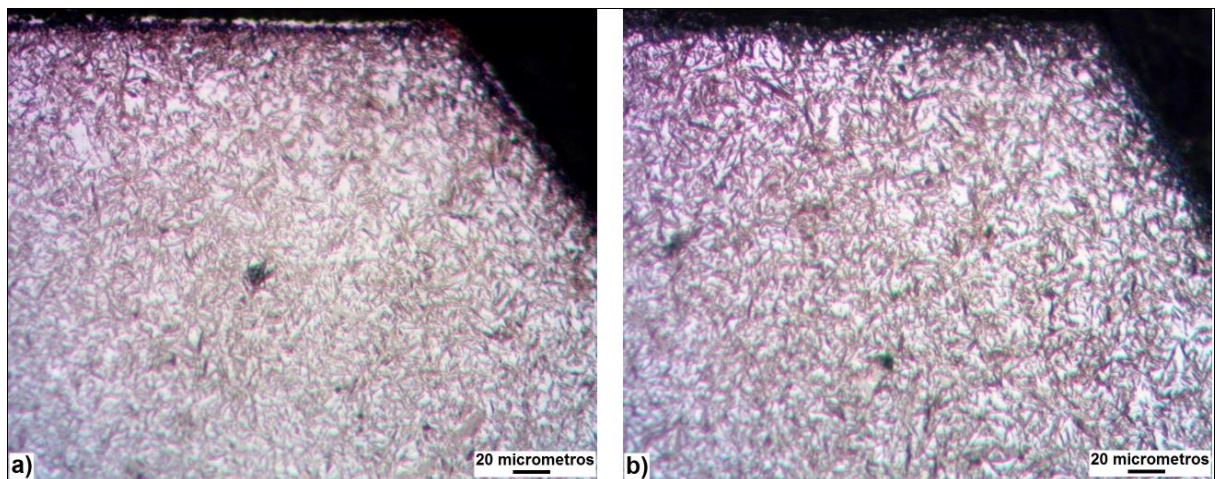
Fonte: Autor (2021)

Figura 26 - Micrografias no topo do dente da engrenagem para  $C_x = 0,50\%C$  (cementação por 3h29min a  $900^{\circ}C$ ): a) amostra-5, aumento 100X; b) mesma região, aumento 200X; c) amostra-6, aumento 100X; d) mesma região com aumento 200X. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 27 - Micrografias no topo do dente na condição de  $C_x = 0,50\%C$  (ampliação das regiões na Fig. 26): a) amostra-5; b) amostra-6. Microestrutura martensítica contendo provavelmente algum percentual de austenita retida junto à superfície. Aumento 400X, ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Segundo Chiaverini (2002) pode haver formação de austenita retida pela têmpera direta em óleo em alguns aços usados para cementação, sendo influenciada pelos teores dos elementos de liga e pelo aumento do teor de carbono; tal fase causa alguma diminuição na dureza superficial de peças cementadas, não sendo afetada pelo revenimento posterior. Também se supõe que a retenção de austenita possa diminuir o nível de tensões residuais geradas na martensita, aumentando a tenacidade na região cementada.

Davis (p.188, 2005) relatou via microscopia óptica a presença de austenita retida distribuída na microestrutura contendo placas de martensita próximo à superfície de uma amostra de aço AISI 8719, que foi submetido à têmpera direta logo após cementação a gás. A presença de austenita retida na martensita reduz a dureza na microestrutura próxima à superfície da peça, o que não é tão desejável para a vida útil no caso da fadiga de contato.

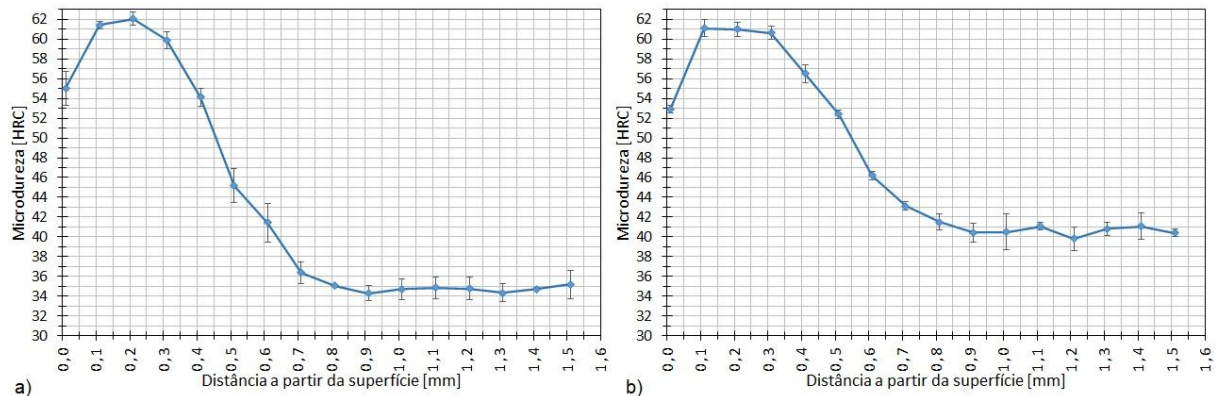
Garcia (2017) e Cardoso (2019) também constataram uma distribuição de regiões claras dispersas na matriz martensítica próximo à superfície dos dentes de engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 4320, tratadas por cementação sólida a 900°C e que foram submetidas à têmpera direta em óleo. Realizado o exame metalográfico nas amostras, ambos autores argumentaram que em tais regiões claras possivelmente se tratava de austenita retida – ensaios de microdureza revelaram que houve uma leve queda na dureza superficial da camada cementada junto à superfície dos dentes.

#### **4.4 Ensaios de microdureza – verificação preliminar**

Na Figura 28 são mostrados perfis de microdureza para as amostras 1 e 2 (condição da variável  $C_x = 0,40\%C$ ), sendo que as medidas foram feitas a partir do topo para o meio dos dentes. Notou-se que até as profundidades de 0,45 mm e 0,50 mm foram obtidos valores de dureza acima de 50 HRC, respectivamente nas Fig. 28a e 28b. Os valores tomados próximo à superfície dos dentes (até  $\approx 0,05$  mm) ficaram na faixa de 53-58 HRC, enquanto na profundidade entre 0,1-0,3 mm foram anotados os maiores valores entre 60-62 HRC.

Os perfis de microdureza vistos na Fig. 29 se referem às amostras 3 e 4 (variável  $C_x = 0,45\%C$ ), também com as medições feitas do topo para o meio dos dentes das engrenagens. Nas profundidades de até 0,50 mm e 0,60 mm foram obtidos valores acima de 50 HRC, respectivamente nas Fig. 29a e 29b. Junto à superfície dos dentes (até  $\approx 0,05$  mm) se obteve valores de dureza na faixa de 54,5-59 HRC, enquanto na profundidade entre 0,1-0,3 mm os valores ficaram na faixa de 61-62,5 HRC.

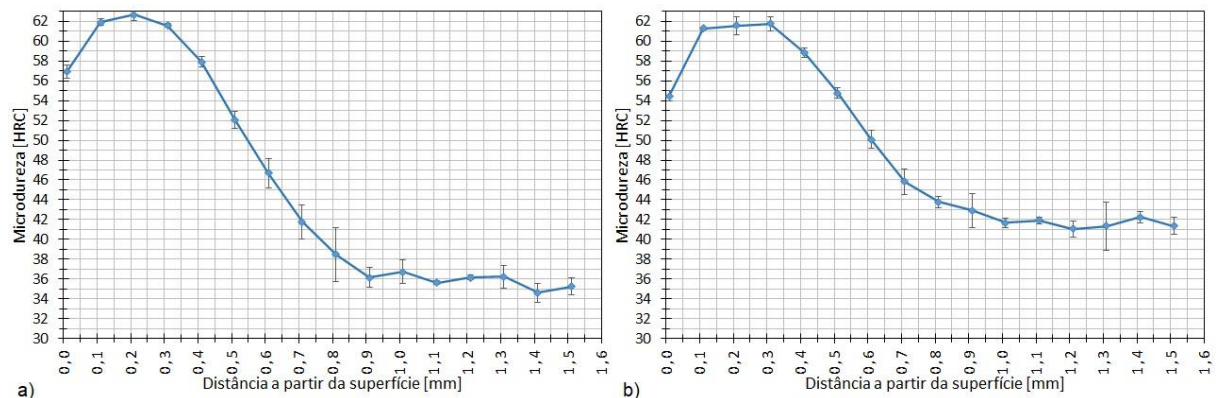
Figura 28 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  (cimentação sólida por 2h19min a  $900^\circ$ ): a) amostra-1; b) amostra-2.



Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).

Fonte: Autor (2021)

Figura 29 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável  $C_x = 0,45\%C$  (cimentação sólida por 2h51min a  $900^\circ$ ): a) amostra-3; b) amostra-4.



Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).

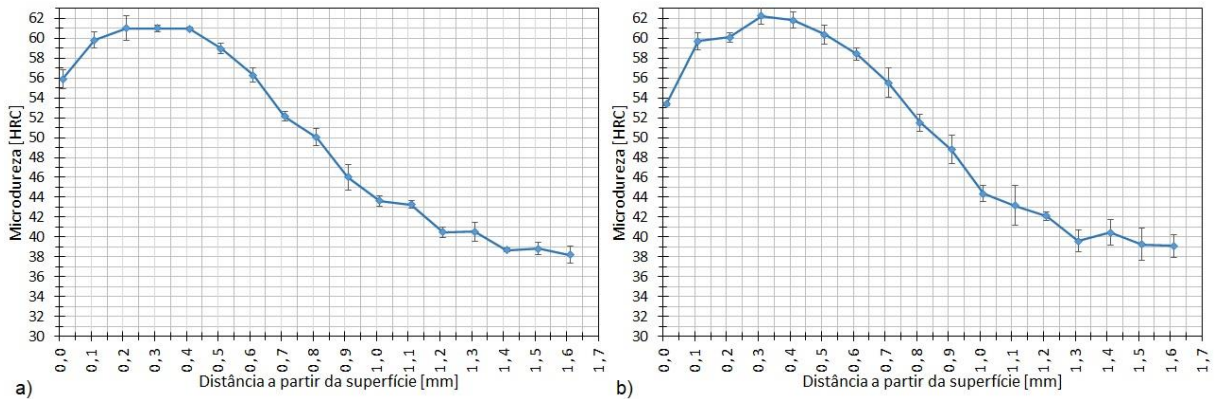
Fonte: Autor (2021)

A Figura 30 exibe os perfis de microdureza das amostras 5 e 6 (variável  $C_x = 0,50\%C$ ), igualmente para medições feitas do topo para o interior dos dentes das peças cementadas. Nas profundidades de até 0,80 mm e 0,85 mm foram obtidos valores de dureza acima de 50 HRC, respectivamente nas Fig. 30a e 30b. No caso de valores tomados junto à superfície dos dentes (até  $\approx 0,05$  mm) foi obtida uma faixa de 53,5-58 HRC, enquanto na profundidade entre 0,1-0,4 mm foram registrados os maiores valores de dureza na faixa de 60-62 HRC.

A profundidade da camada endurecida por cimentação em rodas dentadas pode ser estimada em função do tamanho do módulo do dente. No presente estudo, a profundidade desta camada foi estimada pela variável  $x$ , aplicada nos cálculos da equação (1) na segunda lei de Fick; o módulo vale 2,0 (variável  $m$ , desenho técnico dado no Anexo I). De acordo com

Mazzo (2013) para valores do módulo na faixa  $2,0 \leq m < 2,5$  deve-se ter como requisito a profundidade desta camada entre 0,40-0,60 mm para uma melhor vida útil da peça.

Figura 30 - Perfis de microdureza do topo para o interior dos dentes na condição da variável  $C_x = 0,50\%C$  e (cementação sólida por 3h29min a  $900^\circ$ ): a) amostra-5; b) amostra-6.



Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).

Fonte: Autor (2021)

Estudos recentes sugerem que tal camada endurecida por cementação deve apresentar valores de dureza no mínimo acima de 50 HRC ( $\approx 550$  HV), sendo que a profundidade efetiva dessa camada deve ser tomada a partir deste valor (HOSSEINI, 2012; HOSSEINI e LI, 2016).

Os valores de dureza registrados próximos à superfície dos dentes e na região do núcleo para as três condições testadas nos experimentos ficaram dentro do esperado, segundo dados na literatura consultada. Houve também uma transição gradual nos valores de dureza medidos a partir da superfície para a região no núcleo dos dentes. Davis (p.197, 2005) cita que a dureza na camada cementada no aço AISI 8620 pode atingir valores de 58-60 HRC; e no geral para aços usados na fabricação de engrenagens cementadas a dureza próxima ao núcleo da peça pode variar entre 32-48 HRC.

Os perfis de microdureza para as condições da variável  $C_x$  igual a 0,40%C e 0,45%C foram satisfatórios, pois ambos os testes resultaram valores de dureza acima de 50 HRC para profundidades na faixa de 0,40-0,60 mm. Porém, os resultados na condição de  $C_x$  igual a 0,50%C foram insatisfatórios. Isto porque a profundidade atingida no experimento (valores acima de 0,80 mm) ultrapassou o limite especificado, ou seja, houve uma difusão de carbono relativamente excessiva neste maior tempo de cementação sólida.

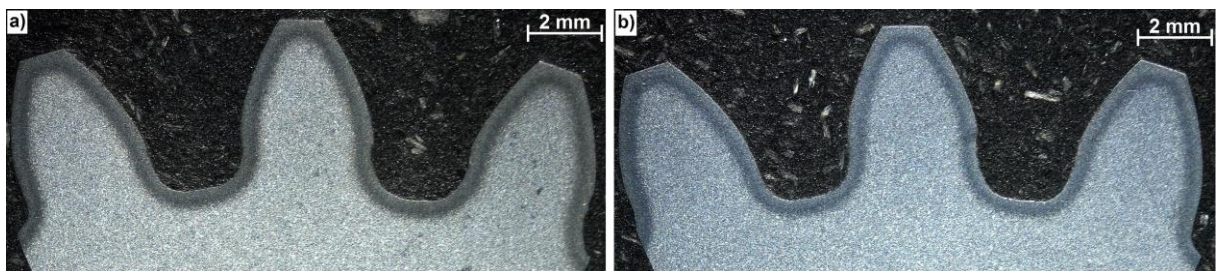
## 4.5 Experimentos de reprodutibilidade

Nesta parte final do trabalho foram realizados experimentos para análise da reprodutibilidade dos resultados satisfatórios obtidos nas etapas anteriores, ou seja, aqueles que atenderam requisitos de dureza acima de 50 HRC para a profundidade da camada cementada na faixa de 0,40-0,60 mm (específica para dentes retos de módulo 2).

### 4.5.1 Análise macrográfica

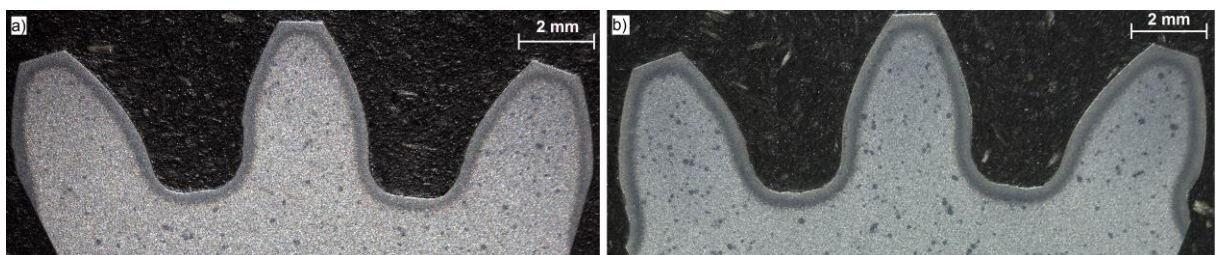
Nas Figuras 31, 32 e 33 são vistas macrografias obtidas nos experimentos de reprodutibilidade. A Fig. 31 apresenta um par de amostras retiradas de engrenagens com largura de face 12,5 mm, cementadas por 2h51min a 900 °C (condição  $C_x = 0,45\%C$ ). As Figs. 32 e 33 mostram pares de amostras removidas de engrenagens com largura de face 20,00 mm, cementadas por 2h19min a 900 °C (condição  $C_x = 0,40\%C$ ). Em ambas condições testadas, notou-se que se formou uma região contínua e homogênea logo abaixo da superfície dos dentes – como já visto anteriormente na Fig. 20 (ver pág. 45). Pode-se afirmar que ocorreu suficiente difusão de carbono durante a etapa de cementação sólida, e que a aplicação de têmpera direta resultou na formação de camada região diferenciada junto à superfície.

Figura 31 - Macrografias na condição para  $C_x = 0,45\%C$  e cementação por 2h51min a 900°C (teste de reprodutibilidade, largura de face = 12,50 mm): a) amostra-7; b) amostra-8. Ataque nital 3%.



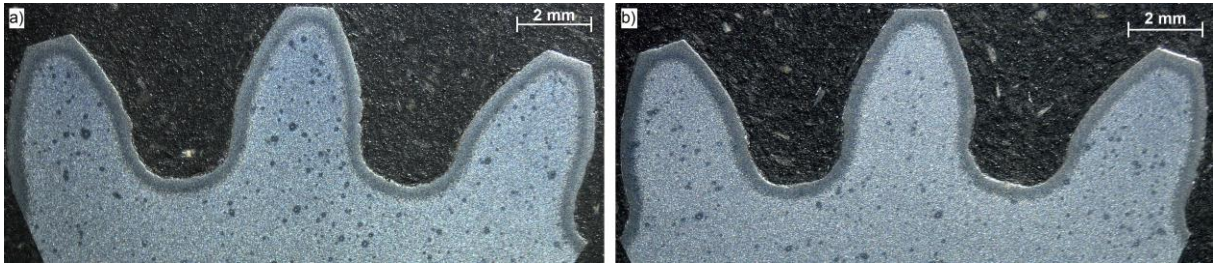
Fonte: Autor (2021)

Figura 32 - Macrografias na condição para  $C_x = 0,40\%C$  e cementação por 2h19min a 900°C (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-9; b) amostra-10. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 33 - Macrografias na condição para  $C_x = 0,40\%C$  e cementação por 2h19min a  $900^\circ C$  (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-11; b) amostra-12. Ataque nital 3%.

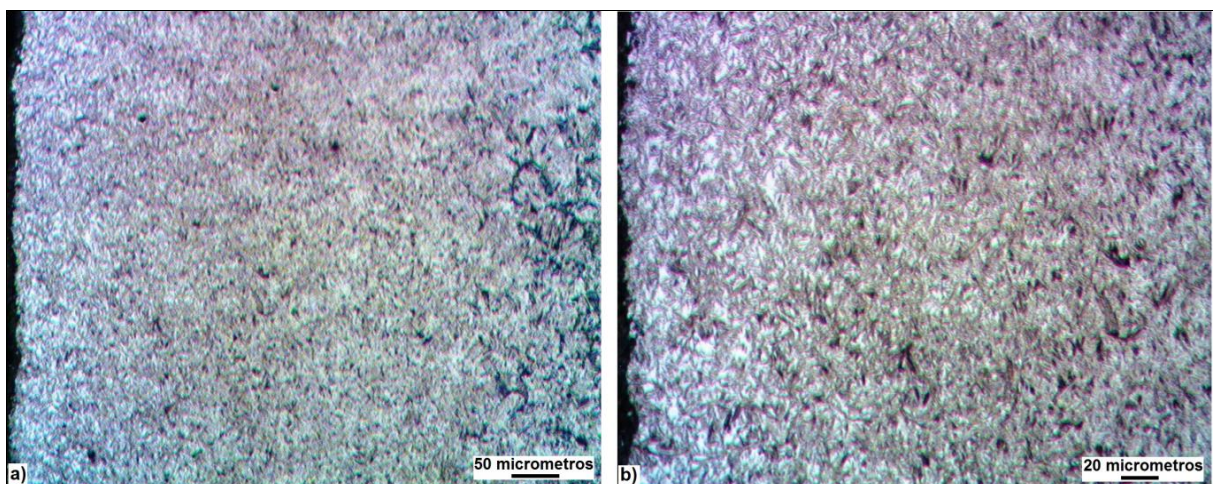


Fonte: Autor (2021)

#### 4.5.2 Análise metalográfica

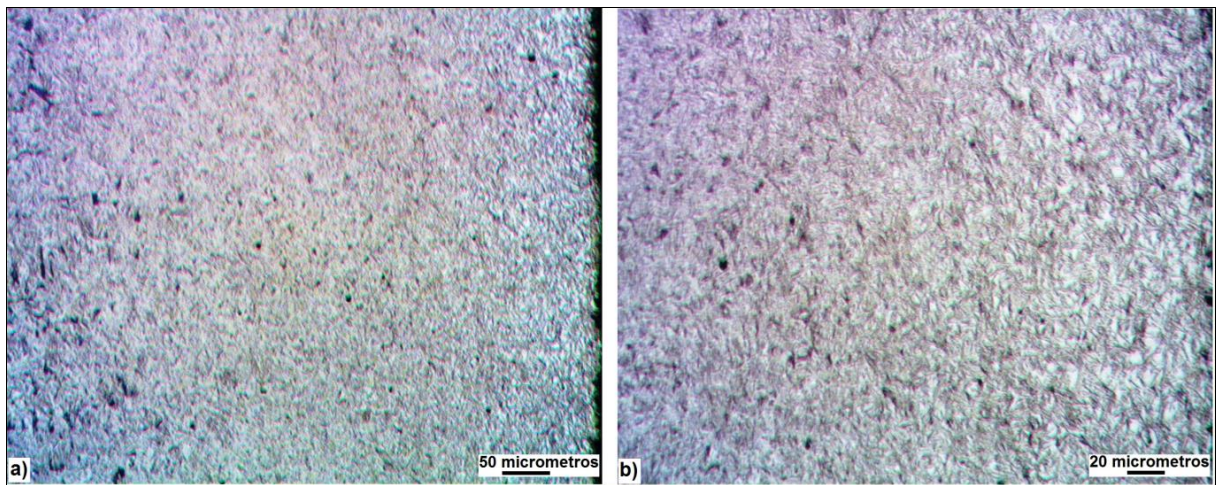
As Figuras 34 e 35 mostram micrografias das amostras 7 e 8, respectivamente. Ambas foram removidas de engrenagens com largura de face 12,50 mm cementadas por 2h51min a  $900^\circ C$  (condição  $C_x = 0,45\%C$ ). Nas Fig. 34a e 35a é possível notar, ainda que parcialmente, três regiões distintas: uma junto à superfície do dente; uma região de transição; e aquela próxima ao núcleo do dente. E nas Fig. 34b e 35b tem-se a ampliação das regiões vistas anteriormente, onde se notou uma região junto à superfície dos dentes contendo uma apreciável dispersão de regiões claras em meio às agulhas de martensita – análise similar àquela para as Fig. 24 e 25 (ver pág. 46). Estas regiões claras provavelmente podem conter algum percentual de austenita retida, sendo tal fato uma possível consequência da utilização da têmpera direta em óleo logo após a cementação.

Figura 34 - Micrografia na lateral do dente da amostra-7, largura de face 12,50 mm (variável  $C_x = 0,45\%C$ , cementação por 2h51min a  $900^\circ C$ ): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2020)

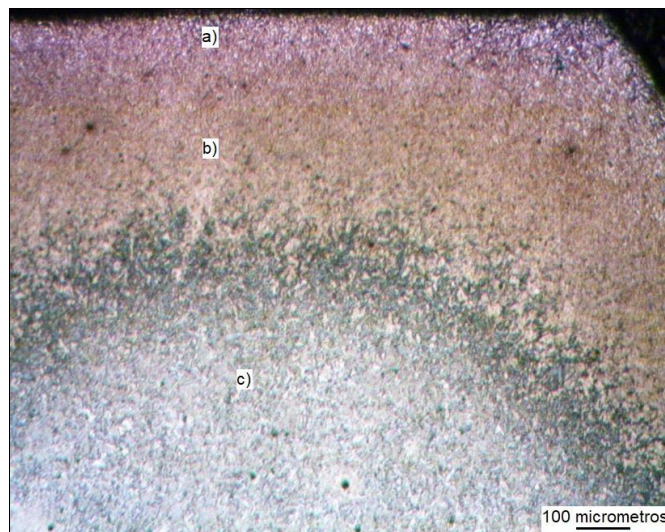
Figura 35 - Micrografia na lateral do dente da amostra-8, largura de face 12,50 mm (variável Cx = 0,45% C, cementação por 2h51min a 900°C): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2020)

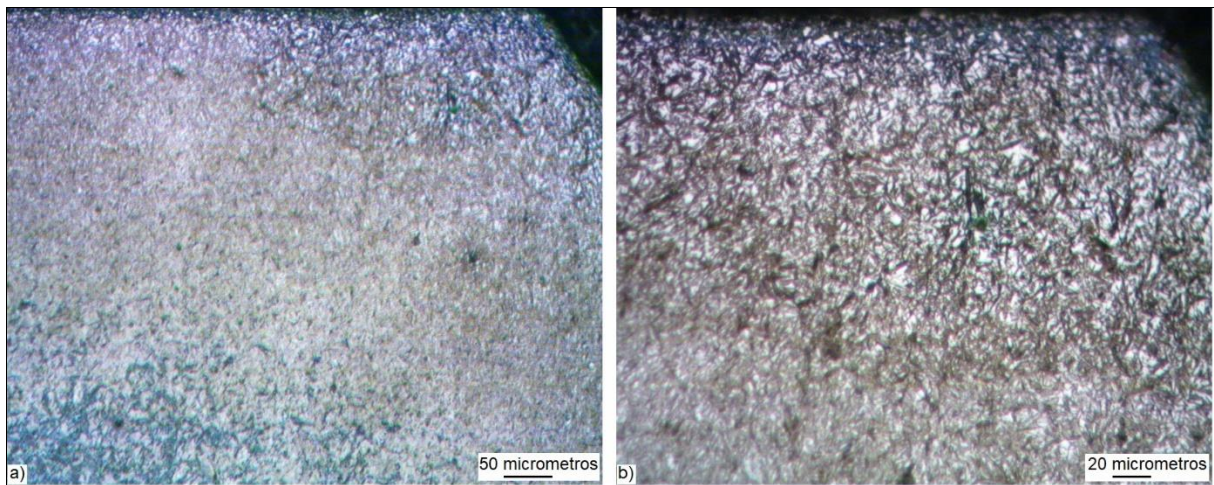
Nas Figuras 36 e 37 são mostradas micrografias retiradas da amostra-9 (condição da variável Cx = 0,40% C; largura de face 20,00 mm). A Fig. 36 apresenta três regiões distintas a partir do topo do dente: a) camada endurecida; b) zona de transição; c) núcleo do dente. Na Fig. 37a tem-se uma região junto à superfície do dente, onde destaca-se a formação da camada endurecida e a zona de transição; enquanto na Fig. 37b é mostrada uma ampliação dessa mesma região, sendo possível notar a microestrutura martensítica com provável dispersão de austenita retida (regiões claras).

Figura 36 - Micrografia no topo do dente da amostra-9, largura de face 20,00 mm (variável Cx = 0,40% C, cementação por 2h19min a 900°C). Presença de regiões distintas a partir da superfície: a) camada endurecida; b) zona de transição; c) núcleo do dente. Aumento 100X. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 37 - Micrografia no topo do dente da amostra-9 (variável  $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) igual região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície (regiões claras). Ataque nital 3%.

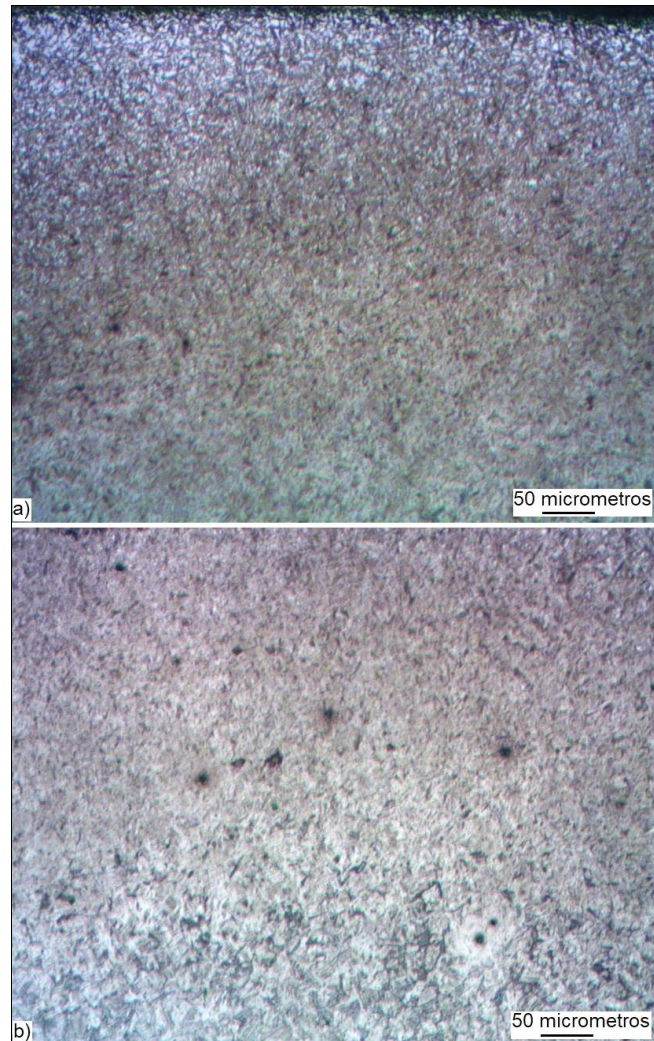


Fonte: Autor (2021)

As micrografias nas Figuras 38 e 39 se referem à amostra-10 que foi cementada na condição da variável  $C_x = 40\%C$  (largura de face 20,00 mm). A composição na Fig. 38 revelou regiões distintas a partir do topo do dente: uma camada cementada junto à superfície e início da zona de transição (Fig. 38a); interface da zona de transição e início da microestrutura no núcleo do dente (Fig. 38b). A Fig. 39 apresenta uma ampliação da região no topo do dente vista na Fig. 38a. É possível observar nessa figura uma microestrutura martensítica contendo uma dispersão de regiões claras com provável presença de austenita retida.

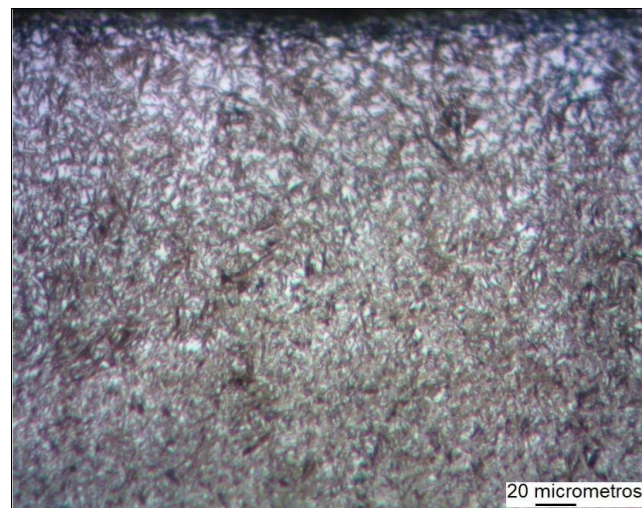
As Figuras 40 e 41 mostram micrografias das amostras-11 e 12, sendo que ambas foram removidas de engrenagens com largura de face 20,00 mm e cementadas por 2h19min a  $900^{\circ}C$  (condição  $C_x = 0,40\%C$ ). Nas Figs. 40a e 41a estão evidentes regiões distintas a partir do topo do dente, como também citado anteriormente na Fig. 38; e nas Figs. 40b e 41b são destacadas regiões junto à superfície do dente constituída por uma microestrutura martensítica com provável dispersão de austenita retida (regiões claras).

Figura 38 - Micrografia no topo do dente da amostra-10, largura de face 20,00 mm ( $C_x = 0,40\%C$ ): a) camada cementada junto à superfície com dispersão de austenita retida (regiões claras) e início da zona de transição; b) interface zona de transição e início do núcleo do dente. Aumento 200X. Ataque nital 3%.



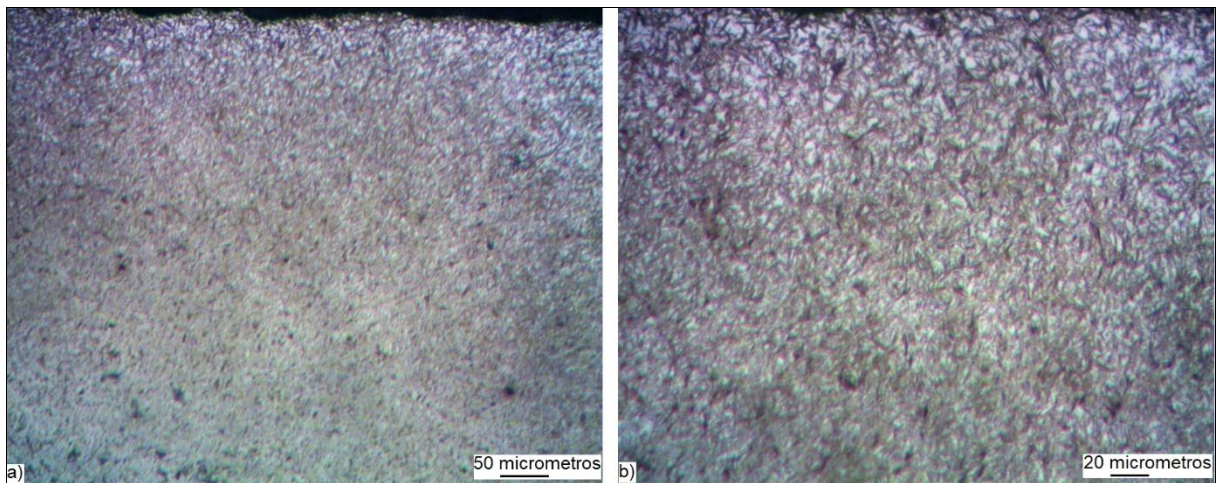
Fonte: Autor (2021)

Figura 39 - Micrografia no topo do dente da amostra-10 (variável  $C_x = 0,40\%C$ ). Microestrutura martensítica contendo dispersão de austenita retida (regiões claras). Aumento 400X. Ataque nital 3%.



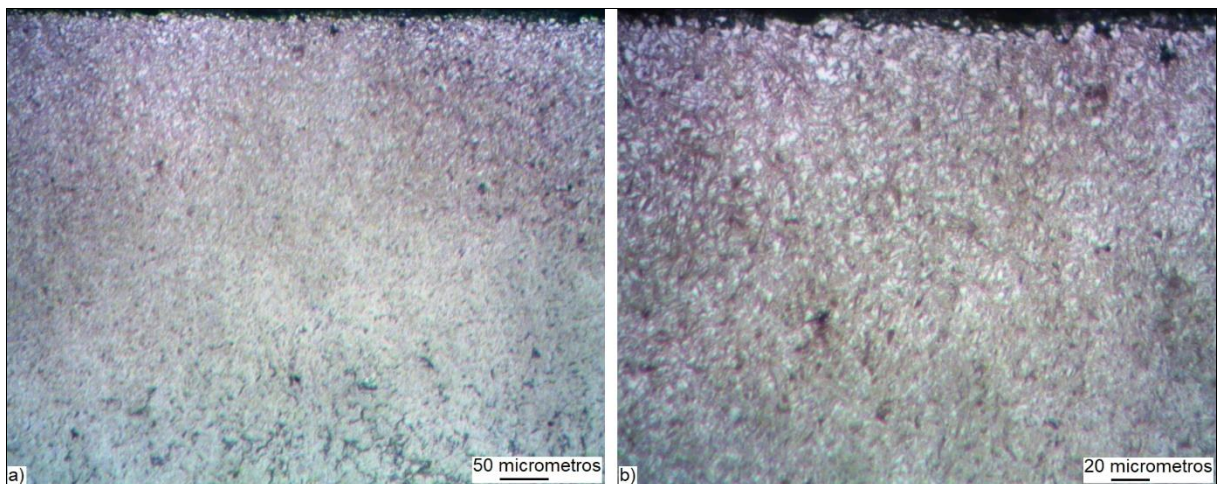
Fonte: Autor (2021)

Figura 40 - Micrografia no topo do dente da amostra-11, largura de face 20,00 mm (variável  $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.



Fonte: Autor (2021)

Figura 41 - Micrografia no topo do dente da amostra-12, largura de face 20,00 mm (variável  $C_x = 0,40\%C$ ): a) aumento 200X; b) mesma região, aumento 400X. Microestrutura martensítica contendo algum percentual de austenita retida junto à superfície. Ataque nital 3%.



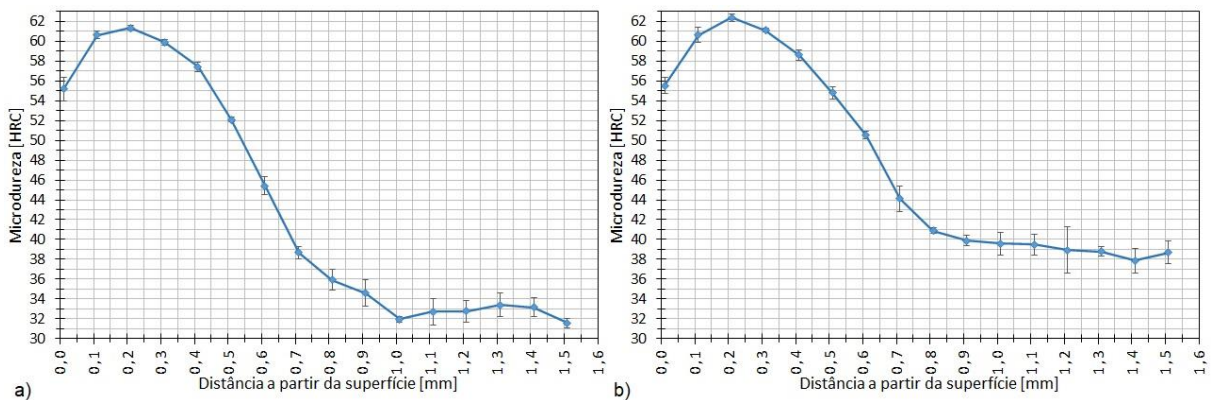
Fonte: Autor (2021)

#### 4.5.3 Ensaio de microdureza

A Figura 42 apresenta perfis de microdureza obtidos para as amostras 7 e 8, após cementação sólida por 2h51min a  $900^{\circ}C$  (condição  $C_x = 0,45\%C$ ). Pode-se constatar que entre as profundidades de 0,45 (ver Fig. 42a) até 0,60 mm (Fig. 42b) foram obtidos valores de dureza acima de 50 HRC. Na região mais próxima à superfície (profundidade de até 0,05 mm) houve valores de dureza entre 55-58 HRC, enquanto nas profundidades de 0,10 até 0,35 mm foram medidos valores acima de 60 HRC.

Os resultados mostrados na Fig. 42 foram similares àqueles apresentados no estudo preliminar mostrado nos gráficos da Fig. 29 (ver pág. 49), onde também foram aplicados iguais parâmetros de cementação. A reprodutibilidade dos resultados nesta condição de cementação foi relativamente satisfatória, entretanto a profundidade média atingida pela camada efetiva (valores de dureza acima de 50 HRC) ficou próxima do limite superior na faixa de 0,40-0,60 mm como requisito técnico para engrenagens de módulo 2,0-2,5. Por isto, decidiu-se realizar os novos experimentos de reprodutibilidade com engrenagens de maior largura de face na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  (tempo de 2h19min a 900°C).

Figura 42 - Perfis de microdureza na condição da variável  $C_x = 0,45\%C$  e cementação sólida por 2h51min a 900° (teste de reprodutibilidade, largura de face = 12,50 mm): a) amostra-7; b) amostra-8.

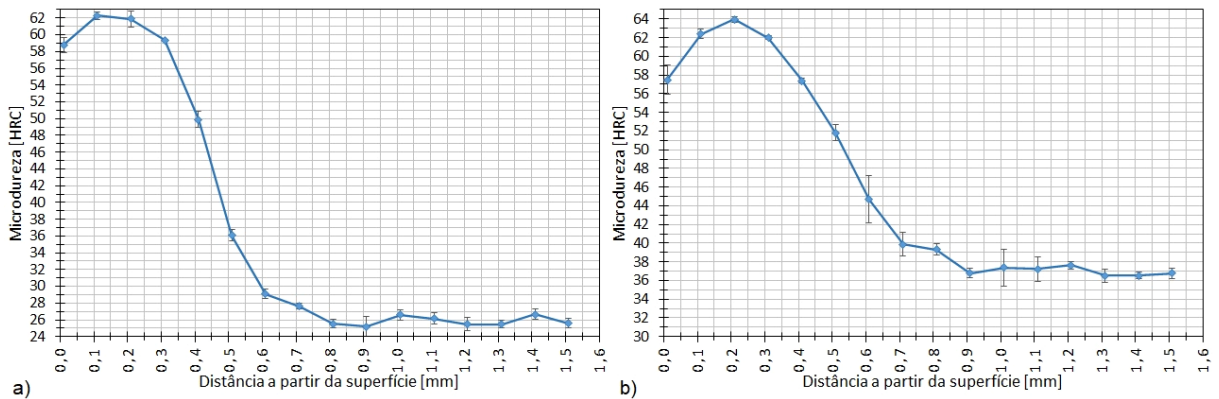


Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).  
Fonte: Autor (2021)

Na Figura 43 são mostrados perfis de microdureza para as amostras-9 e 10, obtidos após cementação sólida por 2h19min a 900°C (condição  $C_x = 0,40\%C$ ). Nota-se que valores de dureza acima de 50 HRC foram obtidos até as profundidades de aproximadamente 0,40 mm (ver Fig. 43a) e 0,55 mm (Fig. 43b). Na região próxima ao topo do dente (profundidade de até 0,05 mm) houve valores entre 57-59 HRC, enquanto nas profundidades de 0,10 até 0,35 mm foram medidos valores acima de 60 HRC.

A Figura 44 apresenta perfis de microdureza para as amostras-11 e 12, que também foram obtidos de peças cementadas por 2h19min a 900°C (condição  $C_x = 0,40\%C$ ). Valores de dureza acima de 50 HRC foram registrados até as profundidades de cerca de 0,55 mm (ver Fig. 44a) e 0,45 mm (Fig. 44b). Na região próxima ao topo do dente (profundidade de até cerca de 0,05 mm) houve valores entre 57-60 HRC, enquanto nas profundidades de 0,10 até 0,40 mm foram medidos valores acima de 60 HRC.

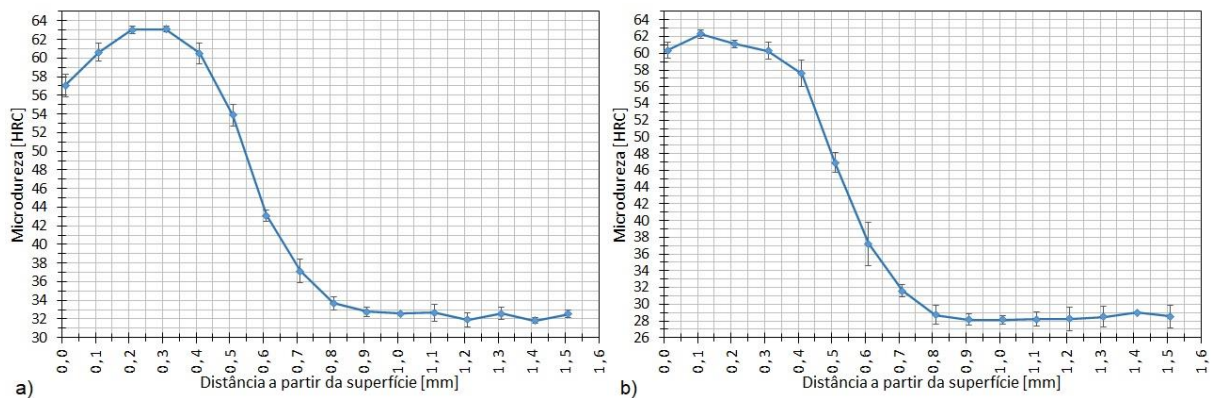
Figura 43 - Perfis de microdureza na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  e cementação sólida por 2h19min a  $900^\circ$  (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-9; b) amostra-10.



Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).

Fonte: Autor (2021)

Figura 44 - Perfis de microdureza na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  e cementação sólida por 2h19min a  $900^\circ$  (teste de reprodutibilidade, largura de face = 20,00 mm): a) amostra-11; b) amostra-12.



Nota: A primeira medida foi registrada cerca de 0,01 mm abaixo da superfície (menor divisão no micrômetro).

Fonte: Autor (2021)

Os resultados dos testes de reprodutibilidade em engrenagens com largura de face 20,00 mm na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  (tempo de 2h19min) foi semelhante àqueles obtidos nos ensaios de dureza para engrenagens com menor largura de face. A profundidade média atingida pela camada efetiva (valores de dureza acima de 50 HRC) se manteve entre 0,40 e 0,55 mm, ou seja, próxima do limite inferior na faixa de 0,40-0,60 mm que é requisito para engrenagens de módulo entre 2,0-2,5. Portanto, a condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  gerou resultados mais satisfatórios de acordo com os requisitos técnicos investigados neste estudo.

## 5 CONCLUSÃO

Constatou-se a aplicabilidade satisfatória da equação da segunda Lei de Fick (regime não estacionário) na cementação sólida com os conjuntos de parâmetros das variáveis  $C_x = 40\%C$  e  $C_x = 45\%C$ . No entanto, o resultado desta aplicação não foi adequado na condição da variável  $C_x = 50\%C$  pois a profundidade atingida pela camada cementada efetiva excedeu bastante o valor de 0,40 mm (variável  $x$ ) fixado nos cálculos.

A análise por macroscopia revelou a formação de uma região homogênea logo abaixo da superfície dos dentes em todas as condições testadas. Isto ocorreu em virtude da aplicação adequada dos tratamentos de cementação sólida e têmpera direta em óleo, visando a formação de uma camada endurecida nas peças.

A análise metalográfica evidenciou a formação de regiões distintas nas condições testadas: microestrutura martensítica (grosseira) ao longo do contorno dos dentes; uma zona de transição logo abaixo desta (martensita fina); e a região do núcleo. Em áreas junto à superfície notou-se uma dispersão de regiões claras na matriz de martensita, as quais podem conter percentuais de austenita retida.

Nos ensaios de microdureza foi traçado o perfil da camada cementada efetiva, sendo que a aplicação das condições das variáveis  $C_x = 40\%C$  e  $C_x = 45\%C$  gerou resultados que atenderam requisitos técnicos de dureza e profundidade da camada. Nas amostras com tais condições foram registrados valores de dureza acima de 50 HRC nas profundidades de 0,40-0,60 mm, ou seja, atendeu os requisitos estabelecidos; na condição para  $C_x = 0,50\%C$  a profundidade atingida excedeu 0,60 mm.

Nos testes de reprodutibilidade feitos em engrenagens com largura de face 12,50 mm (condição para  $C_x = 45\%C$ ) houve resultados similares na metalografia, e na verificação da dureza e profundidade da camada efetiva em comparação àqueles nos testes preliminares. Porém, nestes resultados a profundidade da camada efetiva ficou próxima do limite superior da faixa de profundidade estabelecida como requisito técnico. Optou-se, então, por realizar os experimentos nas engrenagens de maior largura de face (20,00 mm) na condição da variável  $C_x = 0,40\%C$  – menor tempo de cementação em relação ao anterior. Foram registrados valores de dureza acima de 50 HRC até profundidades na faixa de 0,40-0,55 mm e, portanto, próximos ao limite inferior da faixa de 0,40-0,60 mm que é requisito para engrenagens de módulo entre 2,0-2,5.

Por fim, constatou-se que o procedimento experimental de cementação sólida com têmpera direta nas condições da variável  $C_x = 40\%C$  (cementação a 900°C por 2h19min)

apresentou os resultados mais satisfatórios e boa viabilidade para esse tipo e tamanho de engrenagem. Este procedimento também foi válido para engrenagens com maior largura de face, que atendem critérios de maior resistência mecânica sob esforço de flexão nos dentes.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo são apresentadas sugestões para futuros trabalhos de conclusão de curso ou, então, de projetos de pesquisa os quais poderão investigar melhorias específicas nessa linha de estudo do referido tema:

- Investigar a presença de austenita retida na camada cementada até uma profundidade de cerca de 0,10 mm abaixo do topo do dente, nas condições que geraram resultados satisfatórios neste estudo, podendo-se usar técnicas de difração de raios-X ou de metalografia quantitativa para determinar os percentuais desta fase para a verificação se estes poderiam ser prejudiciais (ou não) à vida útil deste elemento de máquina.
- Utilizar espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS) via microscopia eletrônica de varredura (MEV), buscando-se verificar os percentuais de carbono em seções da camada endurecida a partir do topo dos dentes. Pretende-se comparar estes resultados com as porcentagens teóricas usadas nos cálculos da segunda lei de Fick.
- Fazer novos experimentos de cementação sólida para os resultados satisfatórios do presente estudo, segundo as condições das variáveis  $C_x = 0,40\%C$  e  $C_x = 0,45\%C$  na segunda lei de Fick. Porém, com testes sem aplicação de têmpera direta nas peças cementadas. A partir disso, pretende-se comparar os resultados de ambos os estudos e elaborar um procedimento experimental de cementação mais consolidado para esse tipo e tamanho de engrenagem cilíndrica de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620.

## REFERÊNCIAS

- AÇOS VILLARES. **Aços para Construção Mecânica** – aços para cementação. Catálogo técnico, Aços Villares S.A., p. 4-5, 16-18, 2017.
- ASM International Handbook Committee. **ASM Metals Handbook** – Heat Treating. 10ed. vol. 4, printed in the United States of America, 1991.
- BEPARI, M. M. A. Carburizing: a method of case hardening of steel. In: Saleem Hashmi. *Comprehensive Materials Finishing*. vol. 2. Bangladesh: Elsevier Inc.; 2017. p. 71-106
- 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, doi: 10.1361/shos2002p001, United States of America, 2002.
- DAVIS, J. R. **Gear Materials, Properties and Manufacture**. United States of America, ASM International, 2005.
- 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.
- GARCIA, N. G.; LOPES, P. E. K.; PIMENTA, J. S. Análise da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320 - parte 1. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 13. ed., set. 2018.
- CARDOSO, J.; FERTIG, B. L.; CASTALDO, E. C.; PIMENTA, J. S. Análise da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320 - parte 2. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, 22. ed., nov. 2019.
- GIECK, Kurt. **Manual de Fórmulas Técnicas**. 4. ed. São Paulo: Hemus, 1996.

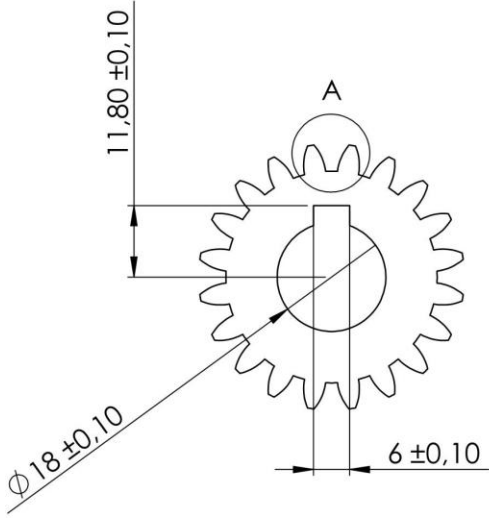
- GUPTA, G. S.; HOSMANI, S. S.; SARKAR, S. Carburizing: Pack. In: Encyclopedia of Iron, Steel and Their Alloys (*online version*). CRC Press, 2015. p. 643-651.
- HOSSEINI, S.R.E. Simulation of Case Depth of Cementation Steels According to Fick's Laws. **Journal Of Iron and Steel Research**, v. 19, n. 11, p.71-78, nov. 2012.
- HOSSEINI, S.R.E.; LI, Z. *Pack Carburizing: Characteristics, Microstructure and Modeling*. **Encyclopedia of Iron, Steel and Their Alloys**, doi: 10.1081/E-EISA-120051080, 2016.
- 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.  
Disponível em: <<http://asminternational.org>> Acesso em: ago.2017.
- MAZZO, Norberto. **Engrenagens cilíndricas: da concepção à fabricação**. São Paulo: Blucher, p. 793-795, 2013.
- MEI, P. R.; COSTA e SILVA, A. L. V. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- MKRAFT AÇOS. **Aços para Construção Mecânica**. Catálogo técnico, MKraft Comércio de Metais Ltda. Disponível em: <<https://www.mkraft.com.br/?l=produtos>> Acesso em: nov.2019.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- RAKHIT, A. K. **Heat Treatment of Gears: a practical guide for engineers**. ASM International, USA, 2000.
- 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.

**APÊNDICE A-** Desenho técnico das engrenagens cilíndricas com largura de face 12,5 mm.

	4	3	2	1	
F	Ângulo de pressão	20°	da	44 mm	F
	m	2	b	12,50 mm	
	z	20	p	6,28 mm	
	d	40 mm	h	4,34 mm	

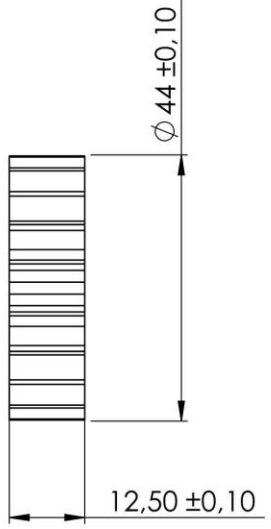
  

E



D

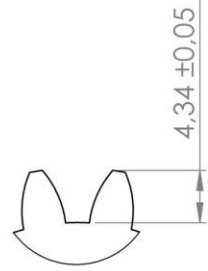
E



D


  

C



B

DETALHE A  
ESCALA 2 : 1



B

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA	DATA: 08/08/2019
AUTOR: BRUNO L. FERTIG	MATERIAL: AÇO SAE 8620
ESCALA: 1:1	QUANTIDADE: 8

4	3	2	1
---	---	---	---

**APÊNDICE B-** Desenho técnico das engrenagens cilíndricas com largura de face 20,0 mm.

