

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
NATÁLIA GONÇALVES GARCIA

ESTUDO DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 4320

Jaraguá do Sul
Novembro de 2017

NATÁLIA GONÇALVES GARCIA

**ESTUDO DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 4320**

Monografia apresentada ao final do curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau do Instituto Federal de Santa Catarina para obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Jean Senise Pimenta,
Dr.Eng.

Jaraguá do Sul
Novembro de 2017

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

Garcia, Natália Gonçalves

**Estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas
de dentes retos de aço SAE 4320 / Natália Gonçalves Garcia
; orientação de Jean Senise Pimenta. Jaraguá
do Sul, SC, 2017.**

59 p.

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


**1. Cementação sólida. 2. Aço SAE 4320. 3. Engrenagem
cilíndrica de dentes retos. I. Pimenta, Jean Senise
. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.**

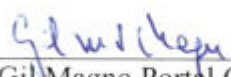
**ESTUDO DA CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 4320**

NATÁLIA GONÇALVES GARCIA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 28 de Novembro de 2017


Jean Senise Pimenta
Doutor em Engenharia Mecânica


Gil Magno Portal Chagas
Doutor em Engenharia Mecânica


Joel Stryhalski
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Jean Senise Pimenta, pela sua disponibilidade, análise crítica, companheirismo e conhecimentos debatidos ao longo da orientação do meu TCC.

Agradeço aos demais professores, em especial aos professores Gil Magno Portal Chagas, Gerson Ulbricht e Mário Cesar Sedrez pelos ensinamentos repassados e discutidos em sala e pela amizade formada no decorrer do curso.

E por fim, agradeço aos demais servidores do Campus Jaraguá do Sul – Rau / IFSC, em especial à bolsista do Laboratório de Ensaaios de Materiais, Priscila Eduarda Kraft Lopes, e aos técnicos Adriano Machado e Robson Oliveira do Apoio Técnico pelo grande auxílio nos experimentos realizados nos laboratórios do campus, os quais muito contribuíram para minha formação de qualidade superior.

RESUMO

A cementação sólida é um tratamento termoquímico usualmente aplicado no endurecimento superficial de engrenagens, fabricadas de aços com baixo teor de carbono. A engrenagem é posicionada dentro de uma caixa de aço com um pó rico em carbono, sendo levada ao forno e permanecendo numa temperatura de austenitização do aço por um determinado tempo. Neste período ocorre a difusão do carbono para o interior do aço. Ao final do processo, a engrenagem deve ser temperada e revenida. Este endurecimento proporciona à engrenagem maior resistência ao desgaste, enquanto seu núcleo permanece dúctil e tenaz. O objetivo principal deste estudo é verificar a aplicabilidade do cálculo de difusão do carbono no aço, baseado na segunda Lei de Fick, comparando o estudo teórico com os resultados obtidos na prática. Nos cálculos teóricos foram escolhidas três concentrações de carbono para uma mesma profundidade de camada cementada, e seus respectivos tempos de difusão do carbono foram calculados (tempo de forno). Após o experimento, amostras das engrenagens foram removidas e preparadas para análises metalográfica e de microdureza. A avaliação das imagens feitas no estereoscópio e no microscópio óptico, bem como a análise dos perfis de microdureza constatou que, na prática, os cálculos de difusão não foram satisfatórios nas condições de cementação sólida aplicadas nas amostras 2 e 3. Somente os resultados experimentais da amostra 1, que ficou cerca de 2,4 h no forno (o menor dos três tempos), apresentou uma profundidade de camada endurecida próxima àquela recomendada para engrenagens com módulo 2.

Palavras-Chave: cementação sólida, aço SAE 4320, engrenagem cilíndrica de dentes retos.

ABSTRACT

Pack carburizing is a thermochemical treatment widely used to harden the surface of low carbon steel gears. The gear is placed inside a steel box with some carbon rich powder, then it is put into the oven and it remains at the austenitizing temperature of the steel for a determined period of time. During this period, carbon diffusion occurs into the steel. At the end of the process, the gear must be quenched and tempered. This hardening treatment makes the gear more wear resistant while its core remains ductile and tough. The main objective of the present study is to verify the applicability of the steel carbon diffusion calculation, based on the second Fick's Law, by comparing the theoretical study with the experimental results. In the theoretical calculations, three carbon contents were chosen for the same carburized layer depth and their respective carbon diffusion times were calculated. After the experiment samples were cut from the gears and prepared for metallographic and microhardness analysis. The evaluation of the stereoscope and optical microscope images, as well as the analysis of microhardness profiles, verified that the diffusion calculations were not satisfactory under the pack carburizing conditions applied to samples 2 and 3. Only the experimental results for sample 1, which was kept in the oven for about 2.4 h (the shortest exposure time), showed a hardened layer depth close to that which is recommended for gears of module 2.

Keywords: pack carburizing; SAE 4320 steel; spur gear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Influência do tempo e da temperatura na penetração superficial de carbono.	15
Figura 2.	Gradiente de carbono em cementação durante 4h a 1050°C com etileno.	16
Figura 3.	Seção transversal junto à superfície de uma barra de aço baixo-carbono cementada em caixa após normalização e têmpera; nota-se uma região carbonetada rica em martensita (à esquerda).	18
Figura 4.	Esquema da região onde a peça carbonetada foi austenitizada para têmpera (ver Fig. 3); a região cementada foi completamente austenitizada, enquanto que o núcleo da peça está na zona crítica.	19
Figura 5.	Engrenagem cilíndrica de dentes retos	20
Figura 6.	Parte do diagrama Fe-Fe ₃ C indicando a solubilidade sólida máxima aproximada de carbono na austenita para alguns aços AISI.	24
Figura 7.	Micrografia do aço SAE 4320 usado neste trabalho. Presença de grãos de ferrita (fase clara), grão de perlita (fase escura) e dispersão de carbonetos na matriz. Ampliação 200X.	28
Figura 8.	Detalhe da micrografia vista na Fig. 8, destacando a presença de carbonetos. Ampliação 400X.	28
Figura 9.	a) vista superior das engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste TCC; b) detalhe das engrenagens (dimensões na escala em milímetros).	29
Figura 10.	a) torno convencional usado para usinagem de uma barra cilíndrica para servir de suporte das engrenagens na fresadora; b) detalhe do suporte concluído (Ø18mmx150mm).	31
Figura 11.	a) Foto indicando o início do fresamento; b) fresamento com destaque para o aparelho divisor; c) ampliação da primeira volta do fresamento; d) finalização do fresamento.	31
Figura 12.	Dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos sem correção.	33
Figura 13.	Imagem no estereoscópio da amostra 1.	41
Figura 14.	Imagem no estereoscópio da amostra 2.	41
Figura 15.	Imagem no estereoscópio da amostra 3.	41
Figura 16.	Amostra 1: escala de 200µm, ampliação 40X.	42
Figura 17.	Amostra 2: escala de 200µm, ampliação 40X.	43
Figura 18.	Amostra 3: escala de 200µm, ampliação 40X.	43
Figura 19.	Amostra 1: escala de 100µm, ampliação 100X.	44
Figura 20.	Amostra 2: escala de 100µm, ampliação 100X.	44
Figura 21.	Amostra 3: escala de 100µm, ampliação 100X.	45
Figura 22.	Amostra 1: escala de 500µm, ampliação 200X.	45
Figura 23.	Amostra 2: escala de 500µm, ampliação 200X.	46
Figura 24.	Amostra 3: escala de 500µm, ampliação 200X.	46
Figura 25.	Amostra 1: escala de 200µm, ampliação 400X.	47
Figura 26.	Amostra 2: escala de 200µm, ampliação 400X.	47
Figura 27.	Amostra 3: escala de 200µm, ampliação 400X.	48
Figura 28.	Amostra 1: meio do dente da engrenagem, escala de 500µm, ampliação 200X.	49

Figura 29. Esquemática dos perfis de microdureza e numa região na base dos dentes.	50
Figura 30. Perfil de microdureza HRC na amostra 1.	50
Figura 31. Perfil de microdureza HRC na amostra 2.	51
Figura 32. Perfil de microdureza HRC na amostra 3.	51
Figura 33. Diagrama esquemático da profundidade da camada cementada (adaptado do original).	52
Figura 34. Diagrama de revenimento da camada cementada em banho de sal, têmpera direta em óleo e revenimento por 2 horas nas temperaturas indicadas (aço SAE 4320, amostras Ø22mm x 10mm).	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Profundidade da cementação em rodas dentadas.	19
Tabela 2.	Tabulação de valores para função erro.	25
Tabela 3.	Tabulação de alguns dados sobre difusão atômica.	25
Tabela 4.	Composição química (% peso) da barra de aço SAE 4320, segundo dados do fabricante.	27
Tabela 5.	Composição química (% peso) do aço SAE 4320, segundo norma SAE J404-1994.	27
Tabela 6.	Componentes da mistura, registro CAS e composição química (% peso) do pó usado para cementação sólida, segundo dados do fabricante Wolf. Hacker & Cia Ltda.	30
Tabela 7.	Características físicas de alguns tipos de óleos de tempera encontrados no mercado.	30

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
1.1.1 Objetivo geral.....	13
1.1.2 Objetivo específico.....	13
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1 Tratamentos Termoquímicos.....	14
2.1.1 Cementação Sólida (ou em Caixa).....	17
2.2 Engrenagens.....	20
2.2.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos.....	20
2.3 Mecanismo de Difusão Atômica.....	21
2.3.1 Difusão em Regime Estacionário e Não Estacionário.....	22
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 Materiais.....	27
3.2 Métodos.....	30
3.2.1 Cálculo para Dimensionamento da Engrenagem.....	32
3.2.2 Cálculo do Tempo para Difusão do Carbono.....	34
3.2.3 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico.....	38
3.2.4 Práticas Laboratoriais.....	39
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	40
4.1 Análise Metalográfica na Região Cementada.....	40
4.2 Perfis de Microdureza.....	49
5 CONCLUSÕES.....	54
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
APÊNDICE A – Desenho esquemático das engrenagens cilíndricas de dentes retos.....	59
fabricadas neste trabalho.	

1 INTRODUÇÃO

Ao projetar uma peça deve-se ter em mente as propriedades mecânicas que esta deverá possuir para que desempenhe sua função de maneira satisfatória. As ligas ferrosas são amplamente utilizadas na indústria metalmeccânica, devido à sua versatilidade para os processos de conformação mecânica e à possibilidade de serem tratadas termicamente a fim de que atinjam as propriedades mecânicas desejadas.

No caso de engrenagens, que são comumente utilizadas para transmitir movimentos rotativos entre eixos, e essa transmissão se dá através de seus dentes, devem estar se movendo de modo que não ocorra travamento ou perda de contato. Dentre os vários tipos de engrenagens no setor metalmeccânico, a mais tradicional é a engrenagem cilíndrica de dentes retos. Esta apresenta baixo custo de fabricação se comparada com os outros tipos. É usada para transmitir movimento circular contínuo entre eixos paralelos de baixa rotação.

Além de resistirem à flexão e à compressão, as engrenagens devem resistir ao impacto e ao desgaste no contato dos dentes. Então, no atendimento geral desses requisitos, os dentes das engrenagens devem apresentar uma camada endurecida com profundidade específica. Além disso, o material da engrenagem deverá manter um núcleo de aspecto dúctil e tenaz para melhor amortecimento de impactos. Essas propriedades podem ser adquiridas através de tratamentos térmicos ou termoquímicos controlados e especificados para cada liga ferrosa. Dentre os tratamentos termoquímicos existentes, o mais usual para engrenagens e que possui menor risco de contaminação externa é a cementação sólida (ou cementação em caixa).

Desta forma, pesquisar e se tentar controlar a profundidade da camada endurecida formada pelo processo de cementação sólida em engrenagens torna-se importante para se aumentar a confiabilidade e durabilidade deste componente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a aplicabilidade dos cálculos de difusão do carbono no estado sólido com os resultados obtidos na prática, por meio da análise da camada endurecida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320 formada pelo tratamento de cementação sólida.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a influência do tempo na difusão do carbono para formação de uma camada endurecida nos dentes de engrenagens de aço SAE 4320;
- Analisar a formação da microestrutura na camada endurecida;
- Verificar os perfis de microdureza a partir da superfície dos dentes cementados;
- Comparar a profundidade da camada endurecida com o valor da profundidade teórica pré-estabelecida, devido às dimensões técnicas das engrenagens.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tratamentos Termoquímicos

Os tratamentos termoquímicos são comumente utilizados para endurecer a superfície dos aços e promover maior resistência ao desgaste, permanecendo o interior do material metálico com aspecto dúctil e tenaz. Estes tratamentos são usualmente aplicados no endurecimento superficial de engrenagens, pinos móveis e eixos de comando, por exemplo. As alterações nas propriedades mecânicas dos aços concentradas na superfície do material são consequência da modificação da composição química nesta região, proporcionada pelos tratamentos termoquímicos. O fenômeno da difusão do elemento endurecedor torna isto possível, devido às altas temperaturas e ao tempo de exposição da peça a uma atmosfera composta pelo elemento a ser difundido na superfície (CHIAVERINI, 2002).

A cementação, nitretação, carbonitretação e a boretção são os tipos mais usuais de tratamentos termoquímicos e, dependendo do procedimento, poderão ser realizados em meio sólido, líquido ou gasoso. O tipo do meio usado nestes tratamentos influencia na velocidade de difusão do elemento (ou agente) endurecedor, incluindo-se as variáveis de temperatura e o tempo (em horas). Tal endurecimento a partir da superfície para o interior do material basicamente ocorre pela difusão de um dado elemento químico (o agente endurecedor) para os interstícios da rede cristalina. Neste trabalho de conclusão de curso empregou-se o tratamento de cementação sólida, sendo que o agente endurecedor foram os átomos de carbono difundidos para a rede cristalina do Fe- γ (microestrutura austenítica do aço).

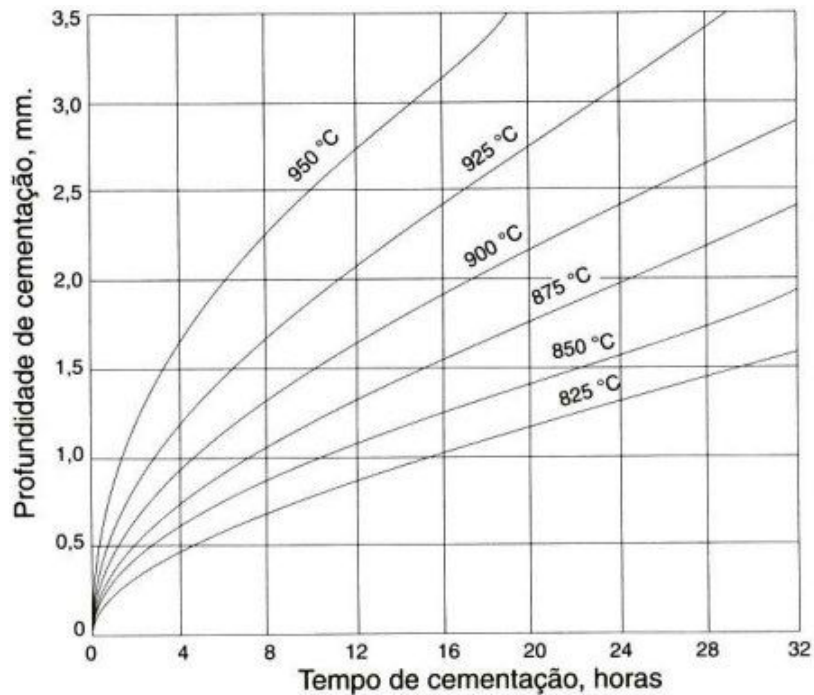
Cementação – tópicos gerais

Carbono é o elemento químico responsável pelo endurecimento de uma camada superficial (abaixo da superfície do material metálico) neste tratamento termoquímico. Recomenda-se que o aço-carbono ou o aço-liga submetido a este tratamento deve conter um teor de até 0,25% de carbono, sendo exposto a uma atmosfera carbonetante numa temperatura acima da zona crítica normalmente entre 850°C e 950°C. Nesta faixa de temperaturas o ferro está na fase alotrópica ferro-gama (ou fase austenítica).

Segundo Chiaverini (2002) há seis fatores que influenciam na velocidade de difusão do carbono na superfície dos aços, a saber: o teor inicial de carbono; o coeficiente de difusão do carbono no aço; a temperatura do tratamento; a concentração de carbono na austenita; a

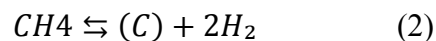
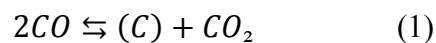
natureza do agente carbonetante; e a velocidade de fluxo do gás (no caso da cementação gasosa, por exemplo). O fator considerado mais importante é a temperatura, que influencia diretamente a velocidade da difusão do carbono e a concentração deste elemento na austenita. A partir da escolha da temperatura do tratamento, seleciona-se o coeficiente de difusão do carbono no aço. A Fig. 1 mostra curvas sob influência do tempo e da temperatura na penetração superficial de carbono, iniciando uma difusão rápida e decrescendo depois.

Figura 1. Influência do tempo e da temperatura na penetração superficial de carbono.



Fonte: CHIAVERINI, 2002.

A natureza do agente carbonetante envolve a transferência de carbono para a superfície e para o interior do aço-baixo carbono. Os agentes mais comuns para liberar carbono (C) são CO e CH₄; basicamente, por meio de reações químicas reversíveis apresentadas nas duas equações abaixo se tem o carbono dissolvido no ferro-gama:

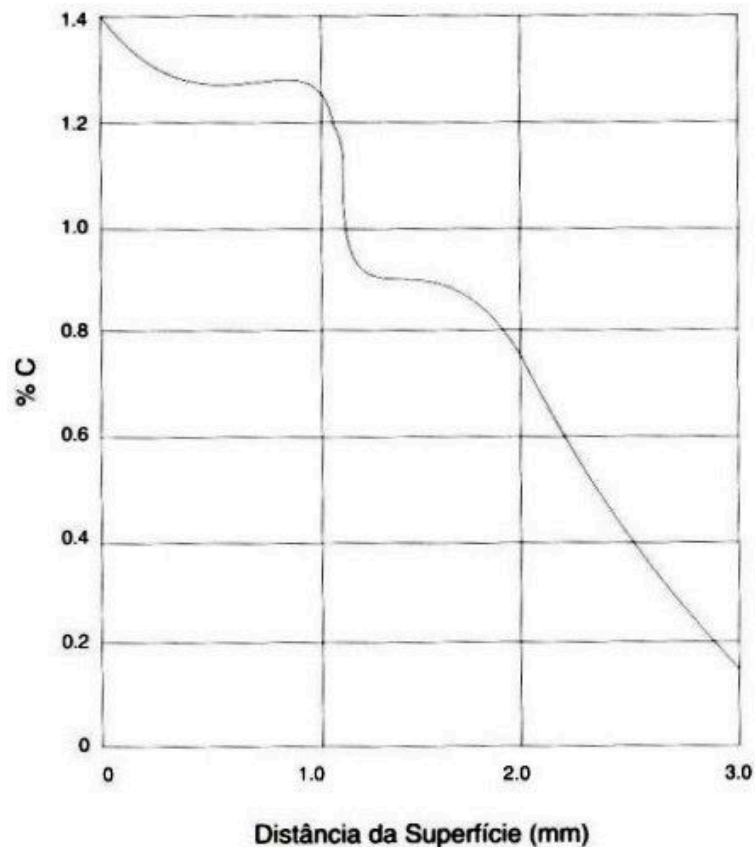


Na cementação sólida, o oxigênio presente dentro da caixa combina-se com o carbono proveniente do pó para cementação a elevadas temperaturas, e produz dióxido de carbono que, por sua vez, reage com os átomos de carbono na caixa para produzir monóxido de

carbono (vide equação 1). Os átomos de carbono provenientes deste monóxido são absorvidos na superfície do aço, enquanto que o dióxido de carbono continua reagindo com átomos de carbono produzindo mais monóxido de carbono (HOSSEINI, 2012).

No processo de cementação recomenda-se que a distribuição do percentual de carbono da superfície ao centro deve ser suave, evitando-se uma queda brusca deste percentual como pode ser visto na Fig. 2 um melhor gradiente de carbono (ou mais suave) pode ser obtido com resfriamentos mais rápidos (CHIAVERINI, 2002). Quando o carbono se difunde para dentro do aço, o teor de carbono na superfície aumenta se comparado com o núcleo da peça de aço; então, depois de resfriado a dureza da superfície do aço aumenta, enquanto que seu núcleo permanecerá macio e dúctil (HOSSEINI, 2012).

Figura 2. Gradiente de carbono em cementação durante 4h a 1050°C com etileno.



Fonte: CHIAVERINI, 2002.

2.1.1 Cementação Sólida (ou em Caixa)

Neste processo as peças que serão cementadas são inseridas em caixas metálicas adequadas, dimensionadas por norma em função do tamanho e distanciamento necessário entre as peças, sendo este conjunto aquecido entre 850°C e 950°C. Dentro destas caixas, além das peças, tem-se inserida uma mistura carburante rica no elemento químico endurecedor (neste caso, o carbono).

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

Na cementação sólida, pode-se atingir uma camada endurecida de profundidade em torno de 2,0 mm (ou superior). Porém, este tipo de cementação é o que proporciona menos controle na profundidade desta camada, podendo ter uma variação total maior que 0,25 mm. Portanto, para projetos que exijam um controle rígido da profundidade da camada endurecida deve-se recorrer à cementação líquida ou à cementação gasosa.

Tratamentos térmicos posteriores à cementação sólida são imprescindíveis, pois a peça cementada em caixa passa algumas horas acima da zona crítica, o que pode resultar algum crescimento de grão. Há duas opções de tratamentos térmicos que servem para refinar o grão: normalização e têmpera ou, então, uma dupla têmpera, ambos seguidos de revenimento a 180°C que alivia tensões residuais provenientes da têmpera. O exame macrográfico posterior aos tratamentos possibilita a observação da homogeneidade e da penetração da camada endurecida.

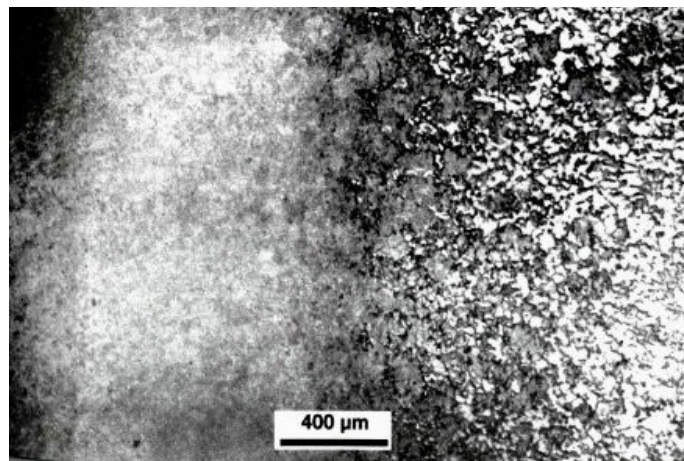
A têmpera é um tratamento térmico que basicamente consiste em aquecer uma peça de aço até que sua microestrutura se torne austenítica, mantendo-a nessa temperatura por um período de tempo e resfriando-a num meio adequado para obtenção de martensita. Esta microestrutura proporciona aumento da dureza superficial da peça, sendo importante quando se pretende aumentar também sua resistência ao desgaste (COLPAERT, 2008). Os meios de têmpera variam em severidade, ou seja, em velocidade de resfriamento. A fim de evitar deformação na geometria de amostras com pequenas dimensões, óleo é o meio mais recomendado (KOWSER, 2015).

A microestrutura martensítica tem como característica intrínseca baixa ductilidade e

alto nível de tensões residuais, o que deixa a peça suscetível a trincas. As altas tensões ocorrem devido à sua formação, que não ocorre por difusão, e sim pela deformação da rede cristalina. Portanto, se faz necessário um tratamento térmico posterior à têmpera para aliviar as tensões residuais. Neste caso, deve-se fazer o tratamento de revenimento, que consiste em aquecer a peça a uma temperatura abaixo da temperatura de austenitização do aço, mantê-la nesta temperatura por um determinado tempo e em seguida resfriá-la dentro do próprio forno. (SILVA, 2010)

Outro tratamento possível é o tratamento térmico de normalização, que, assim como a têmpera, requer que a peça seja aquecida numa temperatura de austenitização, ou seja, acima da zona crítica. Atingida esta temperatura, a peça deverá ser resfriada ao ar. No caso do aço SAE 4320 tal temperatura está em torno de 935°C (CHIAVERINI, 1998, p. 97). A normalização serve para homogeneizar a microestrutura de materiais metálicos, sendo usualmente aplicado em peças fundidas ou forjadas. Outra importante aplicação do tratamento de normalização está no refino do grão austenítico, logo após a prática da cementação sólida (COLPAERT, 2008). Na Fig. 3 é mostrada a microestrutura de um aço baixo-carbono, onde aplicou-se uma prévia normalização seguida do tratamento de têmpera para endurecimento superficial da amostra.

Figura 3. Seção transversal junto à superfície de uma barra de aço baixo-carbono cementada em caixa após normalização e têmpera; presença de região rica em martensita (à esquerda).

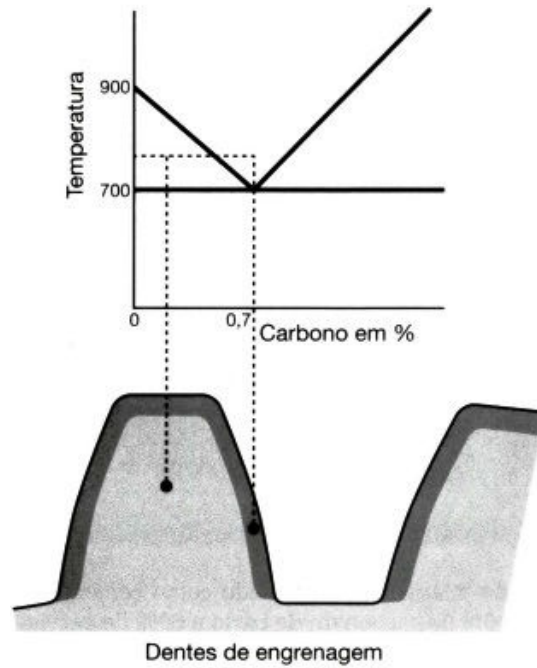


Fonte: COLPAERT, 2008.

Na Figura 4 é mostrado um desenho esquemático onde a temperatura de têmpera foi suficiente para formação de uma camada endurecida (região cementada) nos dentes da engrenagem; as propriedades mecânicas no núcleo da peça não são muito alteradas, preservando a ductilidade do material (COLPAERT, 2008).

A Tabela 1 indica sugestões para as profundidades das camadas endurecidas por cementação em função do módulo normal do dente em rodas dentadas; na figura junto a esta tabela é visto um esquema simplificado da profundidade desta camada no dente da engrenagem.

Figura 4. Esquema da região onde a peça carbonetada foi austenitizada para têmpera (ver Fig. 3); a região cementada foi austenitizada, enquanto que o núcleo da peça ficou na zona crítica.

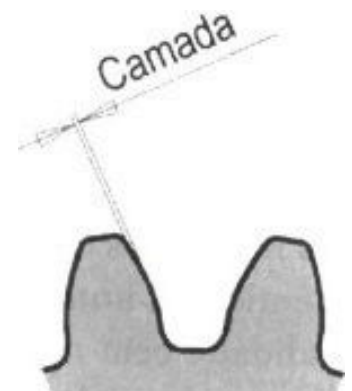


Fonte: COLPAERT, 2008.

Tabela 1. Profundidade da cementação em rodas dentadas.

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

Fonte: MAZZO, 2013.



2.2 Engrenagens

Importantes elementos de máquinas usados na transmissão de movimento rotativo e torque entre eixos, as engrenagens são basicamente cilindros dentados que devem ser projetados de modo que não haja travamento ou perda de contato entre os dentes. Para tal, o par engrenado deve apresentar sincronia de movimento que é atingida quando as velocidades entre os pontos de contato da transmissão são iguais.

O termo engrenagem se refere ao conjunto de pelo menos duas rodas dentadas, sendo uma motora e a outra movida, as quais servem como um tipo de alavanca. Para um mesmo valor de potência, podem ser projetadas de forma que haja um ganho de torque ou de velocidade (MAZZO, 2013).

Segundo Norton (2004), os dentes no par engrenado impedem o escorregamento, que ocorreria se o par fosse desprovido de dentes, ou seja, somente cilíndrico. Esta característica torna esse elemento de máquina ideal para efetuar transmissão de movimento angular uniforme. Outra vantagem é o aumento da capacidade de torque que esses dentes proporcionam.

2.2.1 Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos

De acordo com Norton (2004), as engrenagens cilíndricas de dentes retos são projetadas e fabricadas de forma que seus eixos sejam paralelos entre si e seus dentes paralelos em relação ao seus respectivos eixos. A Fig. 5 caracteriza este tipo de engrenagem, onde pode-se notar a existência de uma chaveta no seu interior usada para travar o eixo e a engrenagem, para que a rotação de ambos seja sincronizada.

Figura 5. Engrenagem cilíndrica de dentes retos.



Fonte: www.mechnol.com

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

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

2.3 Mecanismo de Difusão Atômica

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

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

Quando houver lacunas na rede cristalina de um material metálico, estas podem ser preenchidas por átomos-soluto de outro metal (difusão por interdifusão) ou, então, pela mudança de posição de seus próprios átomos (difusão por autodifusão). Quando um átomo a ser difundido possui raio atômico bem menor do que o raio do átomo hospedeiro da cristalina, ele se moverá nos interstícios desta rede. Por exemplo, no caso dos pequenos átomos de

oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e carbono. Para que haja a movimentação de átomos, ou seja, difusão, é necessário que sejam submetidos a temperaturas elevadas por um tempo especificado – ambos os fatores são previstos de acordo com a taxa de difusão de um elemento químico num dado material metálico. Admite-se que a probabilidade de um movimento atômico intersticial é maior do que uma difusão por lacunas (CALLISTER, 2015).

2.3.1 Difusão em Regime Estacionário e Não Estacionário

O fluxo difusional 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 abaixo (CALLISTER, 2015):

$$J = \frac{M}{A.t} = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

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 $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$ ou $\text{átomos}/\text{m}^2.\text{s}$

Se o fluxo difusional não varia com o tempo há uma condição de *regime estacionário*. Neste caso, a concentração C é apresentada em função da posição (ou da distância x) no interior do sólido resultando num perfil de concentrações; segundo essa teoria, a inclinação num dado ponto sobre essa curva será o gradiente de concentração representado nas equações abaixo onde se admite que o perfil de concentrações é linear (CALLISTER, 2015):

$$\text{gradiente de concentração} = \frac{dC}{dx} = \frac{\Delta C}{\Delta x} = \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} \quad (4)$$

A condição do processo de difusão em *regime estacionário* numa única direção pode ser expressa matematicamente pela equação abaixo, comumente denominada primeira Lei de Fick, na qual o fluxo é proporcional ao gradiente de concentração e a variável D é chamada coeficiente de difusão (em m^2/s). O sinal negativo nesta equação indica que a direção da difusão ocorre contra o gradiente de concentração, ou seja, segue da concentração mais alta para a concentração mais baixa. (CALLISTER, 2015).

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (6)$$

Porém, se o coeficiente de difusão D (medido em m^2/s) não depender da composição do sólido, a segunda lei de Fick fica simplificada para (CALLISTER, 2015):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (7)$$

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

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

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

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

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

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

A aplicação destas condições de contorno resulta na solução para a segunda lei de Fick como visto na equação (8) abaixo (CALLISTER, 2015):

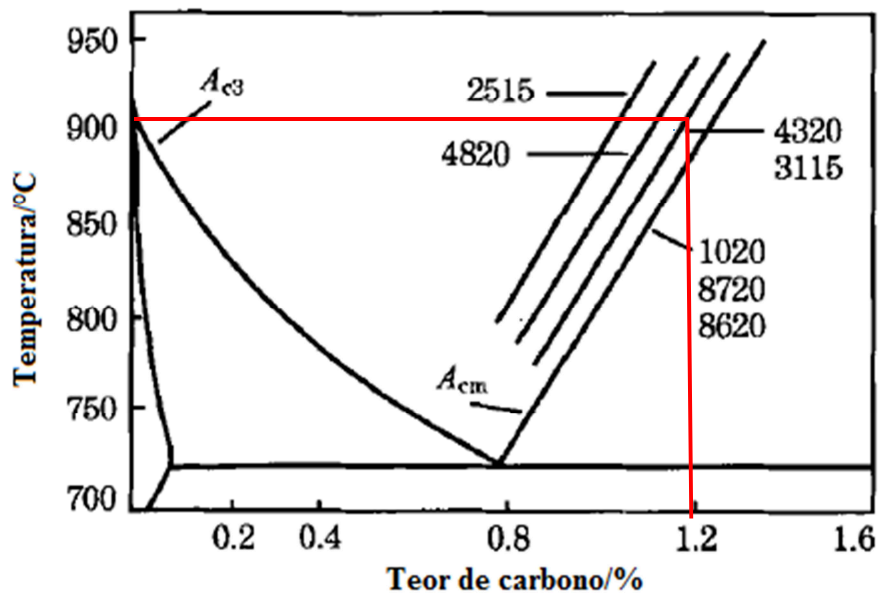
$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (8)$$

onde C_x indica a concentração numa profundidade x após um tempo t ; C_0 é a concentração inicial dos átomos no sólido; e C_s é a concentração constante na superfície do sólido, ou seja, é a solubilidade máxima de carbono na fase austenita do aço. Essa solubilidade depende da temperatura à qual o aço será submetido e de sua composição química (HOSSEINI, 2012). No presente trabalho, utilizou-se o aço SAE 4320 numa temperatura de 900°C para estudo da difusão do carbono. De acordo com a Fig. 6, traçando-se uma reta horizontal na temperatura de 900°C até o gráfico do aço 4320 obtém-se o teor de aproximadamente 1,2% de carbono (variável C_s) – indicativo da solubilidade máxima de carbono na austenita a 900°C para o referido aço (ver indicação em vermelho nesta figura).

A equação $\text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ é a função erro de Gauss, cujos valores são mostrados na Tabela 2; tal função pode ser definida pela equação (9) onde $x/2\sqrt{Dt}$ foi substituída pela variável z :

$$\text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-y^2} dy \quad (9)$$

Figura 6. Parte do diagrama Fe-Fe₃C indicando a solubilidade sólida máxima aproximada de carbono na austenita para alguns aços AISI.



Fonte: Hosseini, 2012.

Tabela 2. Tabulação de valores para função erro.

<i>z</i>	<i>erf(z)</i>	<i>z</i>	<i>erf(z)</i>	<i>z</i>	<i>erf(z)</i>
0	0	0,55	0,5633	1,3	0,9340
0,025	0,0282	0,60	0,6039	1,4	0,9523
0,05	0,0564	0,65	0,6420	1,5	0,9661
0,10	0,1125	0,70	0,6778	1,6	0,9763
0,15	0,1680	0,75	0,7112	1,7	0,9838
0,20	0,2227	0,80	0,7421	1,8	0,9891
0,25	0,2763	0,85	0,7707	1,9	0,9928
0,30	0,3286	0,90	0,7970	2,0	0,9953
0,35	0,3794	0,95	0,8209	2,2	0,9981
0,40	0,4284	1,0	0,8427	2,4	0,9993
0,45	0,4755	1,1	0,8802	2,6	0,9998
0,50	0,5205	1,2	0,9103	2,8	0,9999

Fonte: CALLISTER, p.110, 2015.

Os parâmetros de concentração presentes na equação (8), definida como solução para segunda lei de Fick, resultarão num perfil de concentrações em função do tempo especificamente como função do parâmetro adimensional $x/2\sqrt{Dt}$ que pode ser determinado em qualquer tempo numa posição definida. Na Tabela 3 são apresentados os coeficientes de difusão D para vários materiais metálicos; a espécie atômica em difusão e a rede dos átomos-hospedeiros influenciam diretamente cada coeficiente de difusão (CALLISTER, 2015).

Tabela 3. Tabulação de alguns dados sobre difusão atômica.

<i>Espécie em Difusão</i>	<i>Metal hospedeiro</i>	<i>Valores calculados</i>	
		<i>T(°C)</i>	<i>D (m²/s)</i>
Fe	Fe- α (CCC)	500	$3,0 \times 10^{-21}$
		900	$1,8 \times 10^{-15}$
Fe	Fe- γ (CFC)	900	$1,1 \times 10^{-17}$
		1100	$7,8 \times 10^{-16}$
C	Fe- α	500	$2,4 \times 10^{-12}$
		900	$1,7 \times 10^{-10}$
C	Fe- γ	900	$5,9 \times 10^{-12}$
		1100	$5,3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	500	$4,2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	500	$4,0 \times 10^{-18}$

Fonte: CALLISTER, p.113, 2015

Com relação ao parâmetro C_x , pode-se admitir que a concentração de carbono na camada cementada é geralmente controlada entre 0,7 e 1% para percentual em peso

(KRAUSS, 1990, apud LAMPMAN, 1991). Contudo, essa concentração no geral não excede 0,9% (WICK, VEILLEUX, 1985, apud LAMPMAN, 1991). Isto porque um teor muito elevado de carbono pode resultar em alguma austenita retida junto da martensita. Chiaverini (2002) sugere que alguma quantidade de austenita retida pode ser benéfica para melhorar a tenacidade da camada endurecida, embora reduza um pouco a dureza superficial.

A aplicabilidade da Lei de Fick nos possibilitará estimar o tempo de permanência no forno durante o tratamento de cementação sólida, ou seja, o tempo para que ocorra a difusão do carbono para o interior dos dentes das engrenagens.

3. METODOLOGIA

3.1 Materiais

A Tabela 4 apresenta a composição química da barra de aço SAE 4320 com diâmetro 50,80 mm usada na fabricação das engrenagens cilíndricas de dentes retos, segundo informações do fabricante. O aço SAE 4320 é um aço-liga ao cromo, níquel e molibdênio, contendo no geral (em % peso): 0,17-0,22%C, 0,40-0,60%Cr, 0,20-0,30%Mo e 1,65-2,00%Ni [Databook from American Society for Metals]. Na Tabela 5 é mostrada a composição química deste aço especificada pela norma, servindo de comparativo com os dados apresentados na Tabela 4. Trata-se de um aço muito usado para tratamento de cementação, que possui alta temperabilidade, alta resistência mecânica, boa soldabilidade e baixa usinabilidade em comparação aos aços-carbono comuns.

Realizou-se um ensaio de dureza na escala Rockwell B numa amostra removida desta barra, sendo obtidos os resultados: 81,0; 81,5; 82,0; 79,5; 82,5 HRB. A medida de dureza desta barra foi de $81,3 \pm 5,3$ HRB – nos cálculos do valor médio (X_m) e do desvio-padrão (S) foram empregadas as equações abaixo (MONTEIRO, 1992):

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (10)$$

$$S = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_m)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (11)$$

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

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

Fonte: MKRAFT Aços, Certificado de Qualidade nº 224109.

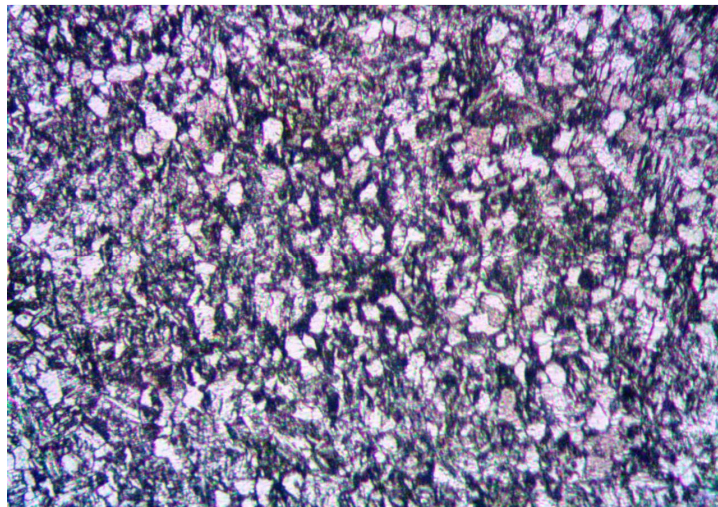
Tabela 5 – Composição química (% peso) do aço SAE 4320, segundo norma SAE J404-1994.

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

A microestrutura do aço SAE 4320 usado neste trabalho está caracterizada nas micrografias vistas nas Fig. 7 e Fig. 8, onde nota-se a presença de grãos de ferrita e de perlita,

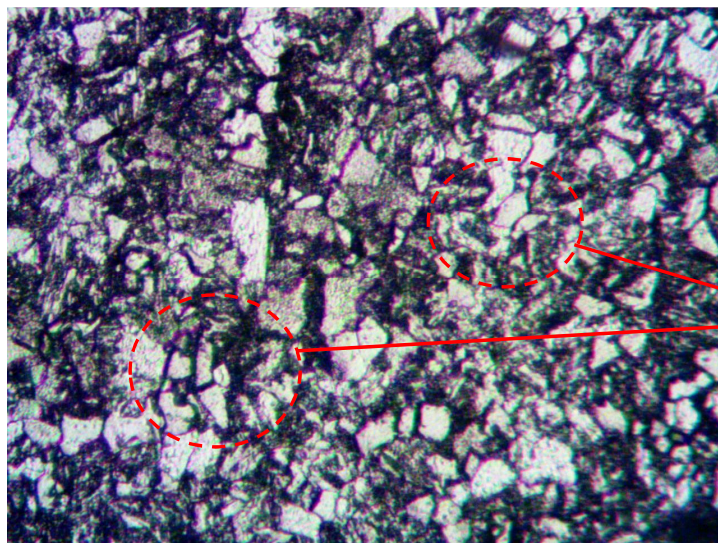
incluindo-se a presença de carbonetos dispersos na matriz. Possivelmente há formação de carbonetos de cromo e molibdênio, devido à existência destes elementos de liga na composição química do material. Diversos elementos têm elevada afinidade pelo carbono e podem formar carbonetos estáveis no aço, tais como: cromo, tungstênio, vanádio, titânio, nióbio e molibdênio (COLPAERT, 2008).

Figura 7. Micrografia do aço SAE 4320 usado neste trabalho. Presença de grãos de ferrita (fase clara), grão de perlita (fase escura) e dispersão de carbonetos na matriz. Ampliação 200X.



Fonte: Autora (2017)

Figura 8. Detalhe da micrografia vista na Fig. 7, destacando a presença de carbonetos. Ampliação 400X.



Fonte: Autora (2017)

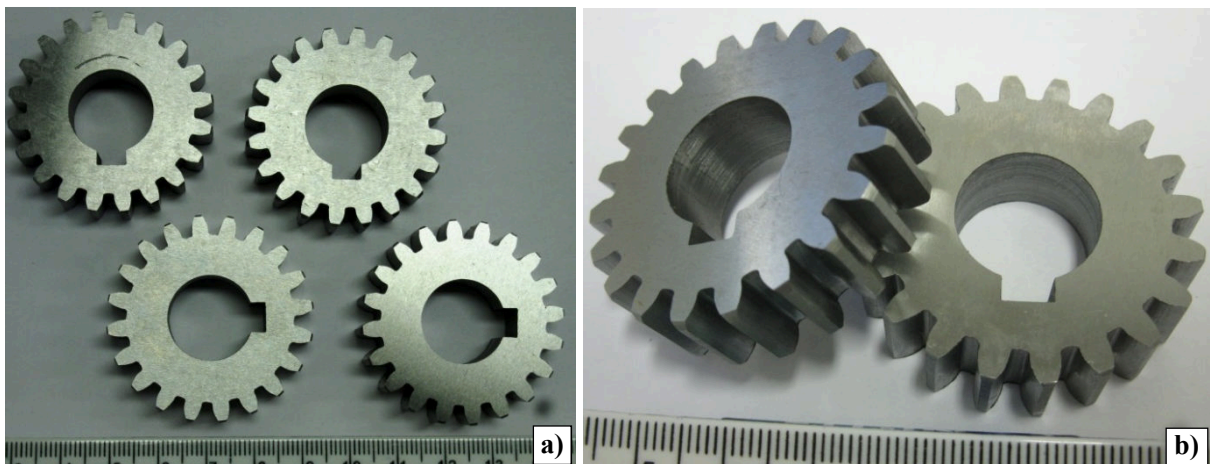
Nas micrografias anteriores, a fase de ferrita está na cor clara e os grão de perlita na cor escura devido ao ataque do reagente nital 2%, corroendo mais uma fase do que a outra

devido ao maior teor de carbono na perlita; a luz é refletida de forma diferente ao microscópio. O mesmo ocorre nas regiões de contorno de grão, que por serem compostas de átomos mais desordenados, são mais facilmente atacados pelo reagente aparecendo na cor escura (SILVA E MEI, 2010).

Na Figura 9 são mostradas as engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas (todas com iguais dimensões), cujo desenho técnico com os parâmetros e respectivas medidas constam no Apêndice 1. A Fig. 9a mostra uma vista frontal das quatro engrenagens fabricadas, enquanto que na Fig. 9b duas engrenagens são mostradas em detalhe. A caixa metálica usada para o tratamento de cementação sólida, armazenando as engrenagens e o pó de cementação, foi fabricada de uma chapa de aço SAE 1020 com espessura 4,0 mm. Especificações técnicas dos componentes que constituem o pó de cementação são fornecidas na Tabela 6.

O óleo industrial usado para o tratamento de têmpera foi o South Oil Temp MO 32, fabricado pela Indústria Química Rocha Ltda. sediada em Curitiba-PR. Este óleo é recomendado para têmpera convencional de média velocidade ou também a frio, não devendo a temperatura do óleo exceder a 70°C. As características físicas deste produto são apresentadas na Tabela 7 que segue.

Figura 9. a) Vista superior das engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste TCC;
b) Detalhe das engrenagens (dimensões na escala em milímetros).



Fonte: Autora (2017)

Tabela 6 – Componentes da mistura, registro CAS e composição química (% peso) do pó usado para cementação sólida, segundo dados do fabricante Wolf. Hacker & Cia Ltda.

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

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

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

Tabela 7 – Características físicas do óleo de têmpera.

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

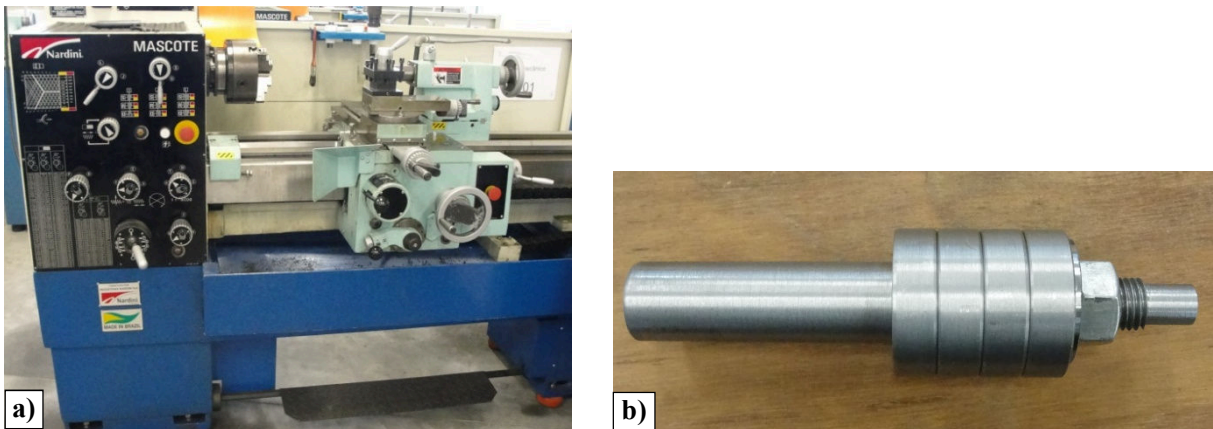
Fonte: Indústria Química Rocha Ltda.

3.2 Métodos

As engrenagens cilíndricas de dentes retos foram fabricadas no Laboratório de Usinagem no Campus Jaraguá do Sul – Rau / IFSC. Primeiramente foi usinada no torno convencional uma barra cilíndrica de aço SAE 1020 para servir de suporte para as engrenagens na fresadora (ver Figura 10). Depois, a barra de aço SAE 4320 foi usinada no torno para o diâmetro externo das engrenagens e quatro blanques (*blanks*) foram cortados na espessura das engrenagens projetadas. Os quatro blanques foram fixados na barra de aço 1020 por meio de uma chaveta, conforme visto na Fig. 10b.

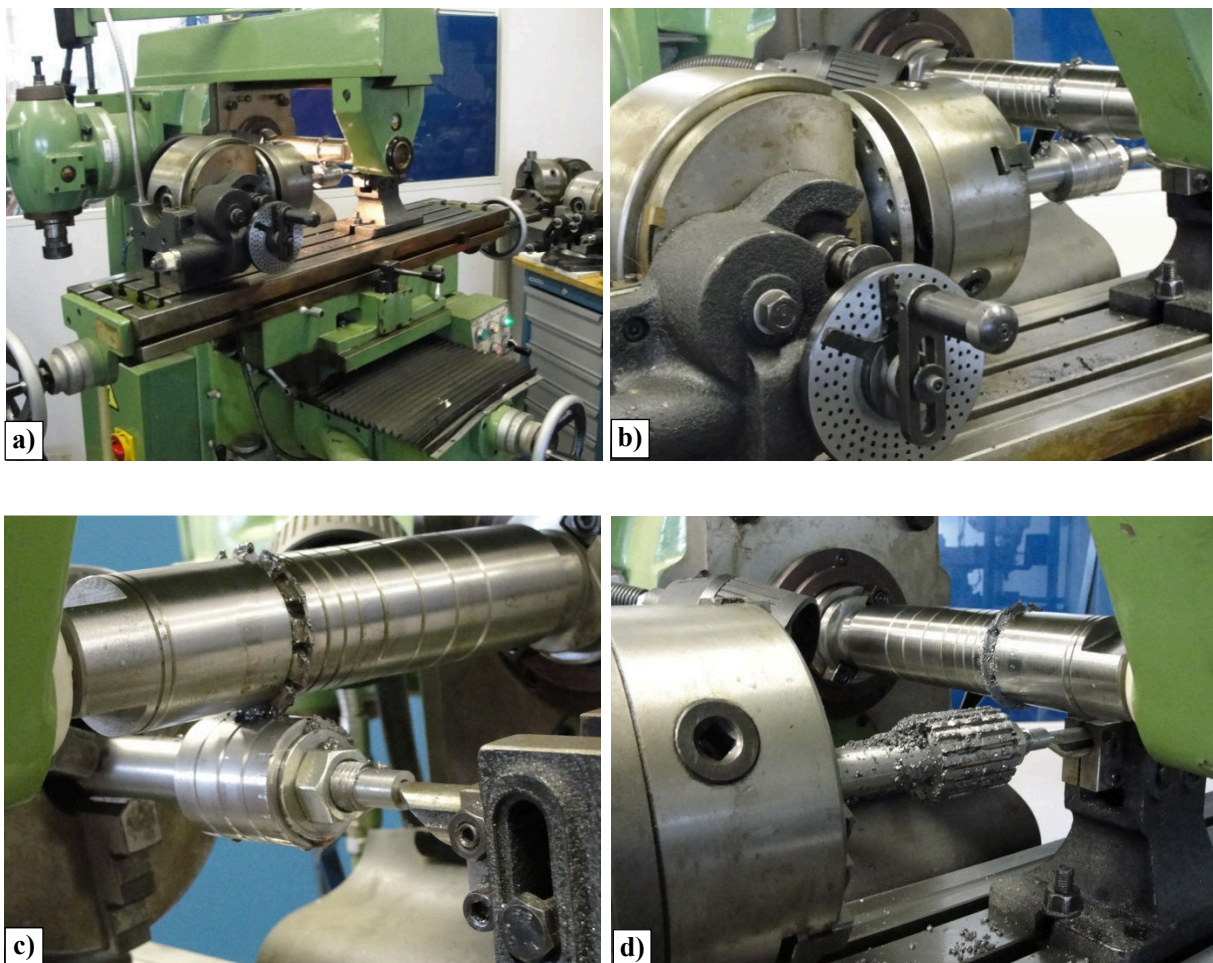
Posteriormente, a barra foi presa ao mandril da fresadora (marca Sunlike, modelo UH-1) e à este foi fixado o aparelho divisor com um disco de 20 furos ao qual eram dadas duas voltas completas por vez. A fresa utilizada foi a nº 3 para módulo 2. A profundidade de penetração total da fresa foi de 4,332 mm (altura dos dentes das engrenagens). No Apêndice A é mostrado o desenho técnico usado na fabricação das engrenagens. A Fig. 11 mostra uma sequência de fotos do fresamento das engrenagens na oficina de usinagem do campus.

Figura 10. a) torno convencional usado para usinagem de uma barra cilíndrica para servir de suporte das engrenagens na fresadora; b) detalhe do suporte concluído ($\text{\O}18\text{mm}\times 150\text{mm}$).



Fonte: Autora (2017)

Figura 11. a) foto indicando o início do fresamento; b) fresamento com destaque para o aparelho divisor; c) ampliação da primeira volta do fresamento; d) finalização do fresamento.



Fonte: Autora (2017)

3.2.1 Cálculo para Dimensionamento da Engrenagem

A fim de projetar uma engrenagem cilíndrica de dentes retos, primeiramente foram escolhidos os seguintes parâmetros: módulo; número de dentes e o ângulo de pressão. Partindo-se destes valores foram obtidos outros parâmetros necessários para este projeto, aplicando-se as fórmulas de Fisher (2008) apresentadas abaixo.

Dentes externos (Fisher, 2008):

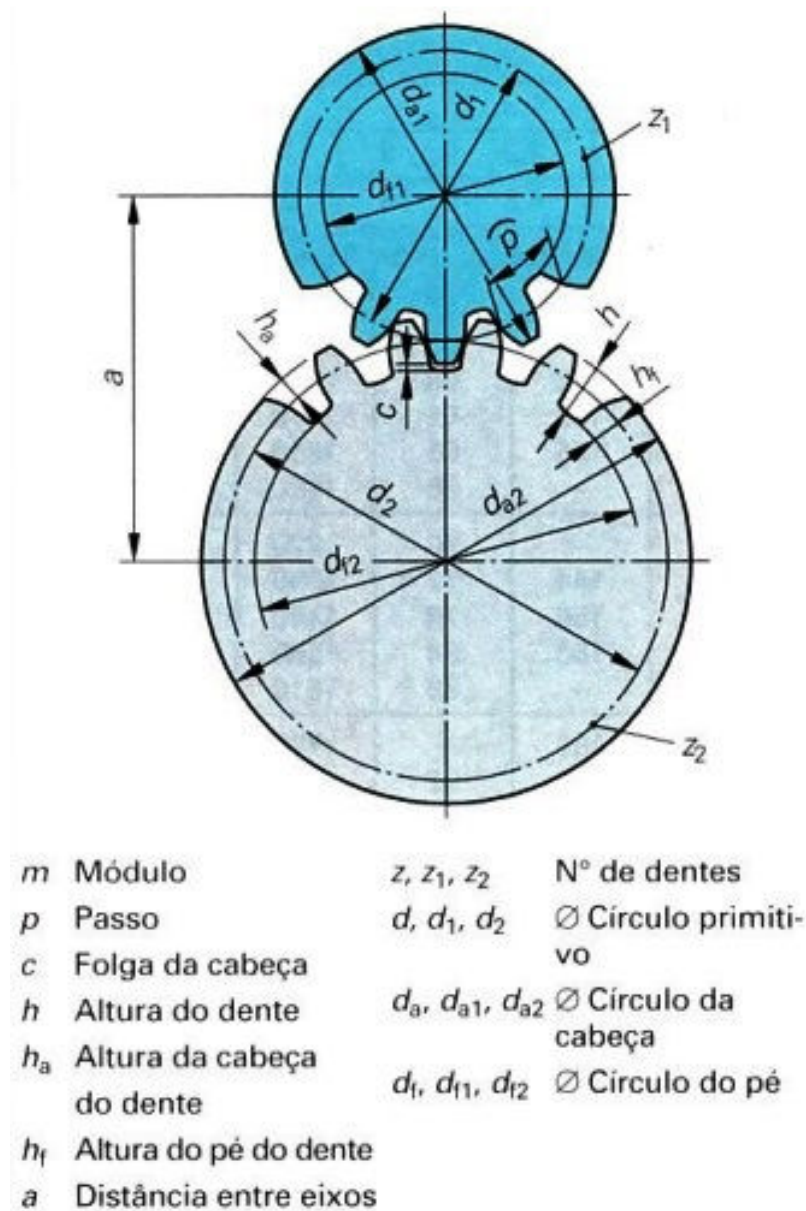
Número de dentes:	$z = \frac{d}{m} = \frac{d_a - 2 \cdot m}{m}$
Diâmetro do círculo da cabeça:	$d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2)$
Diâmetro do círculo do pé:	$d_f = d - 2 \cdot (m + c)$
Distância entre eixos:	$a = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m \cdot (z_1 + z_2)}{2}$

Dentes externos e internos (Fisher, 2008):

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

Na Figura 12 é mostrada uma ilustração esquemática para engrenagens cilíndricas com dentes retos sem correção, incluindo-se os principais parâmetros mecânicos usados nos cálculos para fabricação destas engrenagens. Contudo, tomando-se como base Norton (2004) o ângulo de pressão escolhido foi o de 20° por ser o mais usual. O número mínimo de dentes das engrenagens indicado é de 18, porém as engrenagens deste trabalho foram fabricadas com 20 dentes. No Apêndice A (ver pág. 57) é apresentado um desenho técnico para o dimensionamento das engrenagens fabricadas neste trabalho.

Figura 12. Dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos sem correção.



Fonte: Fischer, 2008, p.256.

3.2.2 Cálculo do Tempo para Difusão do Carbono

Na sequência são apresentados os cálculos do tempo estimado para a difusão do carbono na austenita, conforme a segunda Lei de Fick. Em todos os cálculos foi mantido o valor de 0,40 mm para a profundidade da camada endurecida (variável x); o teor inicial de carbono (variável C_0) e a solubilidade máxima de carbono na austenita para o aço SAE 4320 (variável C_s) foram os mesmos para todos os cálculos, respectivamente 0,19% e 1,20%C. O coeficiente de difusão usado nos cálculos foi $5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para a temperatura de 900°C.

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

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

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

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

Por interpolação:

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

$$z = 0,8898$$

Logo,

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

E resolvendo para t , obtém-se o valor do tempo no forno (em horas):

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

- **Profundidade estimada da camada endurecida (x):** $0,40 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$
 - **Teor estimado de carbono para esta profundidade (% peso):** $C_x = 0,60\%$
- Demais variáveis (% peso): $C_o = 0,19\%$; $C_s = 1,20\%$
- $D = 5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (900°C)

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

$$0,5940 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,338}{\sqrt{t}}\right)$$

z	erf(z)
0,55	0,5633
z	0,5940
0,60	0,6039

Por interpolação:

$$\frac{z - 0,55}{0,60 - 0,55} = \frac{0,5940 - 0,5633}{0,6039 - 0,5633}$$

$$z = 0,5878$$

Logo,

$$\frac{82,338}{\sqrt{t}} = 0,5878$$

E resolvendo para t , obtém-se o valor do tempo no forno (em horas):

$$t = \left(\frac{82,338}{0,5878}\right)^2 = 19621,918 \text{ s} = 327,031 \text{ min} = \mathbf{5,450 \text{ h}}$$

- **Profundidade estimada da camada endurecida (x):** $0,40 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$
 - **Teor estimado de carbono para esta profundidade (% peso):** $C_x = 0,75\%$
- Demais variáveis (% peso): $C_o = 0,19\%$; $C_s = 1,20\%$
- $D = 5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (900°C)

$$\frac{0,75 - 0,19}{1,2 - 0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \times 10^{-4}}{2\sqrt{(5,9 \times 10^{-12})(t)}}\right)$$

$$0,4455 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,338}{\sqrt{t}}\right)$$

z	erf(z)
0,40	0,4284
z	0,4455
0,45	0,4755

Por interpolação:

$$\frac{z - 0,40}{0,45 - 0,40} = \frac{0,4455 - 0,4284}{0,4755 - 0,4284}$$

$$z = 0,4181$$

Logo,

$$\frac{82,338}{\sqrt{t}} = 0,4181$$

E resolvendo para t , obtém-se o valor do tempo no forno (em horas):

$$t = \left(\frac{82,338}{0,4181}\right)^2 = 38792,9 \text{ s} = 646,38 \text{ min} = \mathbf{10,773 \text{ h}}$$

- **Profundidade estimada da camada endurecida (x):** $0,40 \text{ mm} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}$
 - **Teor estimado de carbono para esta profundidade (% peso):** $C_x = 0,80\%$
- Demais variáveis (% peso): $C_o = 0,19\%$; $C_s = 1,20\%$
- $D = 5,9 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (900°C)

$$\frac{0,80 - 0,19}{1,2 - 0,19} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{4 \times 10^{-4}}{2\sqrt{(5,9 \times 10^{-12})(t)}}\right)$$

$$0,3960 = \operatorname{erf}\left(\frac{82,338}{\sqrt{t}}\right)$$

z	erf(z)
0,35	0,3794
z	0,3960
0,40	0,4284

Por interpolação:

$$\frac{z - 0,35}{0,40 - 0,35} = \frac{0,3960 - 0,3794}{0,4284 - 0,3794}$$

$$z = 0,3669$$

Logo,

$$\frac{82,338}{\sqrt{t}} = 0,3669$$

E resolvendo para t , obtém-se o valor do tempo no forno (em horas):

$$t = \left(\frac{82,338}{0,3669}\right)^2 = 50362,2 \text{ s} = 839,37 \text{ min} = \mathbf{13,989 \text{ h}}$$

Levando-se em consideração o que foi relatado no último parágrafo da pág. 25, alguns autores assumem que a concentração de carbono na camada cementada seja controlada entre 0,7 e 1,0% C (em %peso). Adotou-se neste trabalho as concentrações de carbono (variável

Cx) de 0,40%C e 0,60%C, na profundidade de 0,40 mm, a fim de comparar os resultados dos experimentos com aqueles obtidos para 0,75%C (valor dentro da faixa recomendada pela literatura). A opção com 0,80%C foi aqui descartada, devido ao elevado tempo necessário para o experimento de difusão do carbono.

3.2.3 Procedimentos no Forno de Tratamento Térmico

Fabricou-se uma caixa metálica com cerca de 120 x 110 x 110 mm, feita em aço SAE 1020, que foi empregada para acomodar três engrenagens na posição horizontal dentro de um leito com pó de cementação. As mesmas estavam totalmente envolvidas por este pó e igualmente espaçadas com cerca de 20,0 mm entre si e também com relação às paredes da caixa. Feito isto, colocou-se esta caixa dentro do forno de tratamento térmico (marca Quimios, alcance de temperaturas até 1200°C). A caixa foi simplesmente tampada, não estando hermeticamente fechada.

Nesta condição com as três engrenagens colocadas juntas, buscou-se principalmente uma economia de energia elétrica, necessária para o aquecimento e manutenção da temperatura do forno em 900°C. Além disso, houve economia de tempo para os procedimentos no forno destinado para a difusão atômica do carbono numa temperatura com a fase austenítica nos aços. Durante tal experimento, cada engrenagem foi removida após um tempo previamente calculado para manutenção das peças a 900°C. Imediatamente após a remoção de cada engrenagem da caixa de cementação, houve a têmpera direta em óleo com movimentos suaves proporcionando um resfriamento uniforme na peça. Isto também minimiza uma possível concentração de bolhas na superfície da peça, fato que poderia acarretar a formação de microrregiões com baixa dureza.

Posteriormente, as engrenagens foram colocadas juntas dentro do forno para o tratamento de revenimento do aço – prática obrigatória após uma etapa de cementação sólida, seguida de têmpera. Este procedimento foi realizado no forno presente no Laboratório de Ensaio de Materiais do campus, na condição de 200°C por 1 hora. O tratamento de revenimento visou aliviar as tensões residuais geradas na microestrutura martensítica, formada numa camada endurecida superficial em cada engrenagem. De acordo com dados prévios e, especialmente, após análise da Tabela 1 (ver pág. 18) estipulou-se uma profundidade de cementação de cerca de 0,40 mm em função do módulo igual 2 para os dentes das engrenagens.

3.2.4 Práticas Laboratoriais

Os procedimentos utilizados para análise metalográfica e ensaio de microdureza nas amostras do aço SAE 4320, antes da prática para difusão do carbono e aplicação do tratamento termoquímico de cementação sólida, seguido de têmpera em óleo e posterior revenimento, foram basicamente os seguintes:

- corte de material da barra na serra-fita e em máquina policorte;
- corte de dentes das engrenagens para metalografia (após os tratamentos térmicos citados anteriormente), e embutimento a quente com baquelite (especificação MP39) a 250°C por 15 min com cerca de 125 kgf/cm² na embutidora metalográfica (marca Fortel, modelo 30);
- lixamento das amostras embutidas em máquina lixadeira usando lixas d'água para metais na sequência de granulometria 80, 120, 220, 240, 320, 400, 600, 800 e 1200;
- polimento em máquina politriz com alumina 1,0 µm e posterior ataque químico com imersão a frio em Nital 2% por até 10s (exceto nas amostras dos dentes das engrenagens após tratamentos de cementação e têmpera, que levou até 5 s de imersão).
- uso de microscópio óptico (marca KOZ-004, modelo XJM404) para análise da microestrutura do material e da camada endurecida após o tratamento de cementação sólida;
- uso do microdurômetro (marca Future-Tech Corp., modelo FM-800, serie number XM8158) para se traçar perfis de microdureza na escala Rockwell C (HRC) com carregamento de 300 gf por 10 s nas amostras removidas dos dentes das engrenagens cementadas.

Notas:

- 1) Como já citado anteriormente, empregou-se um equipamento denominado microdurômetro, o qual faz medições de dureza Vickers (dureza HV) e, instantaneamente, estes valores de dureza foram convertidos para a escala HRC pelo próprio equipamento;
- 2) Optou-se pela carga de 300 gf (grama-força) pelo fato deste valor ter proporcionado diagonais retas na impressão deixada pelo penetrador. E também por ser este um valor limitante na escala de dureza Vickers, pois quando são usadas cargas menores pode haver alguma recuperação elástica do material metálico. Tal fato dificultaria a medida real das diagonais na impressão, deixada pelo penetrador piramidal de base quadrada feito de diamante. (SOUZA, 1982)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Metalográfica na Região Cementada

As micrografias das amostras 1, 2 e 3 são apresentadas como segue, as quais foram submetidas ao tratamento de cementação sólida por cerca de 2,4h, 5,5h e 10,8h, respectivamente, seguido de têmpera direta após retirada do forno. Nos cálculos mostrados anteriormente, considerou-se um teor de 0,40%C, 0,60%C e 0,75%C respectivamente para as amostras 1, 2 e 3 numa mesma profundidade da camada cementada de 0,40mm.

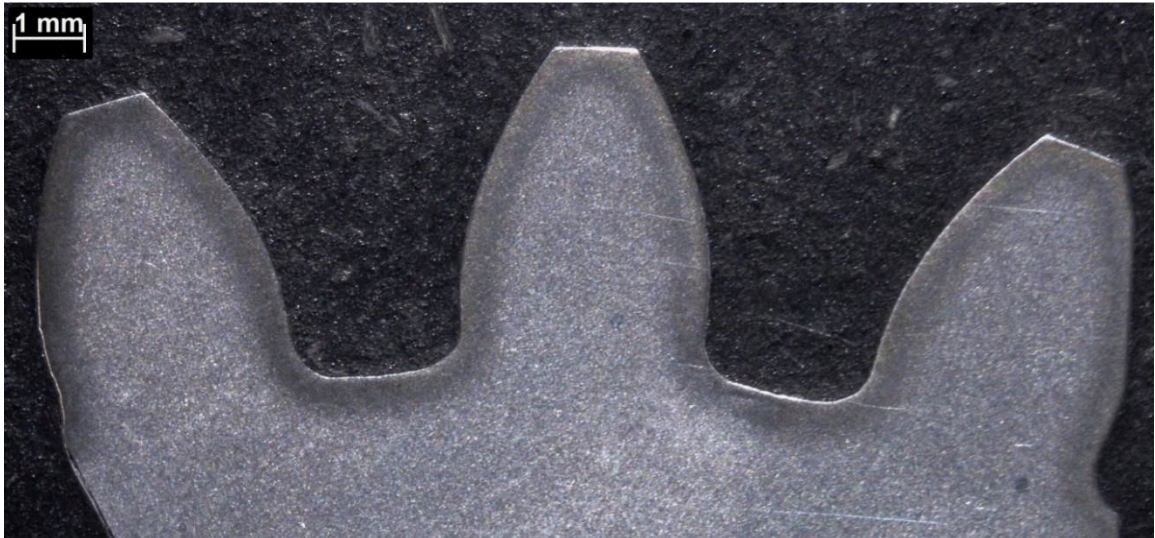
Vale aqui lembrar que, o experimento foi executado com as três engrenagens postas, simultaneamente, dentro da caixa de cementação e igualmente espaçadas de 20 mm entre elas e entre as paredes da caixa. Uma a uma as engrenagens foram removidas da caixa (e submetidas ao tratamento de têmpera) quando era alcançado seu referido tempo de exposição.

Inicialmente são mostradas as imagens obtidas no estereoscópio para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente para as Figuras 13, 14 e 15 na página seguinte. Notou-se a presença de uma região abaixo da superfície dos dentes nitidamente influenciada pelo tratamento de cementação, ou seja, pela difusão do carbono para o interior do aço. Além disso, percebeu-se também que houve um aumento apreciável na espessura de tal região à medida que foi aumentado o tempo do tratamento de cementação para cada engrenagem.

No quesito homogeneidade de camada, ao observar as imagens obtidas no estereoscópio (Fig. 13, 14 e 15), notou-se que a amostra 1 apresentou maior consistência na sua profundidade ao longo do perfil do dente. Visualmente, esta camada mostrou uma profundidade similar tanto no topo quanto na base do dente. Na amostra 2 a profundidade da camada no topo do dente foi, visualmente, um pouco maior do que na sua base. E na amostra 3 ocorreu o mesmo do que na amostra 2, porém a região contendo a camada cementada ficou, visualmente, um pouco mais profunda.

Um possível motivo para a diferença de espessura na camada das amostras 2 e 3 está no maior tempo de exposição à atmosfera carbonetante, aliado ao processo de cementação sólida que não permite bom controle na profundidade desta camada. Os processos de cementação líquida e gasosa propiciam melhor controle na profundidade da camada e também no potencial químico do meio carburante durante este tratamento. A região no topo do dente ficou livremente exposta ao meio carburante, resultando numa difusão mais intensa nesta região do que na região entre dentes, principalmente na base.

Figura 13. Imagem no estereoscópio da amostra 1.



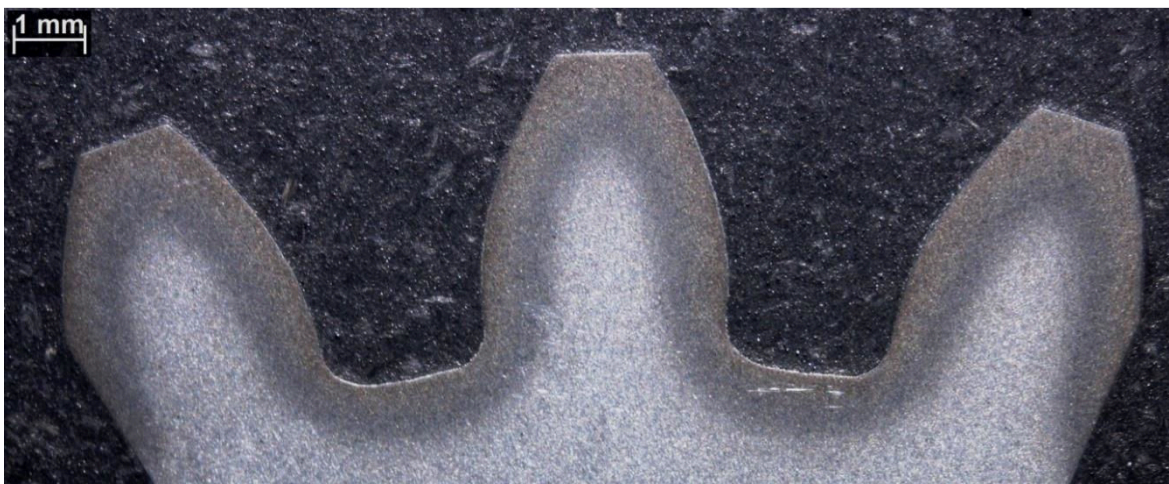
Fonte: Autora (2017)

Figura 14. Imagem no estereoscópio da amostra 2.



Fonte: Autora (2017)

Figura 15. Imagem no estereoscópio da amostra 3.

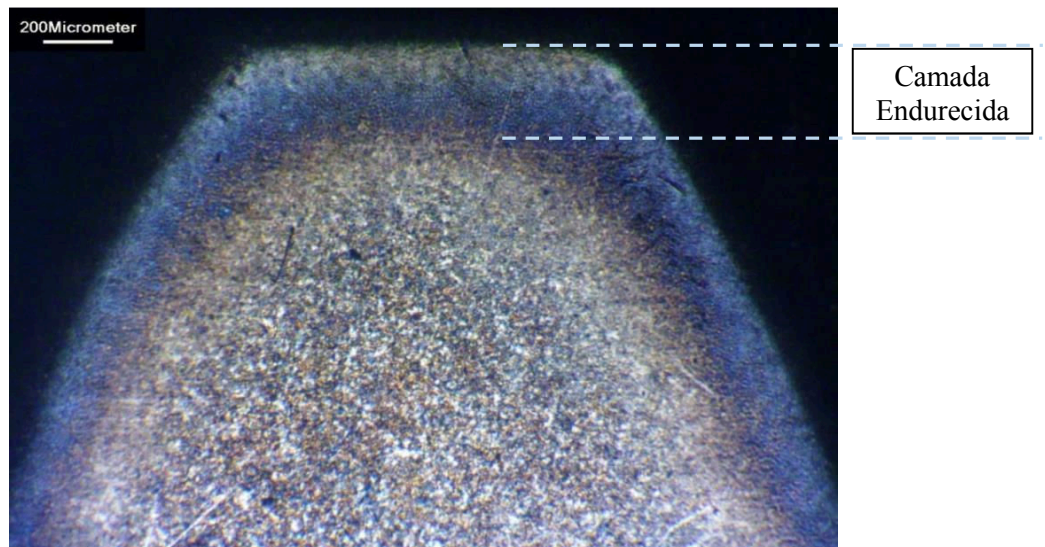


Fonte: Autora (2017)

A homogeneidade na profundidade de camadas endurecidas é um fator relevante. Pois, se a camada apresentar regiões muito espessas ou estreitas, a vida útil da engrenagem será afetada, uma vez que uma penetração insuficiente de carbono na base do dente pode causar falha prematura e uma penetração excessiva na ponta do dente pode deixá-la tão frágil (ASM, 2005).

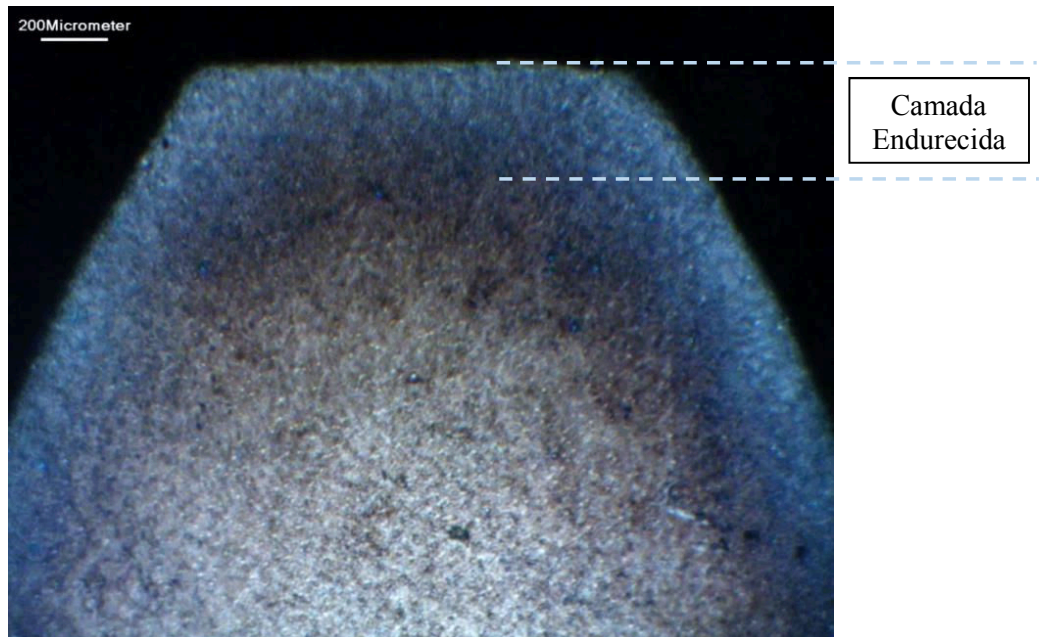
Nas Figuras 16, 17 e 18 são mostradas micrografias obtidas com ampliação de 40X nos topos dos dentes, respectivamente para as amostras 1, 2 e 3. E nas micrografias vistas nas Fig. 19, 20 e 21 há imagens ampliadas em 100X, também para as amostras 1, 2 e 3 nesta ordem. Após a análise destas imagens foi possível constatar que ocorreu a formação de uma camada cementada, de fato, para os três diferentes tempos de exposição no forno. As micrografias com ampliação de 100X já possibilitam notar uma microestrutura gradativamente distinta no sentido da superfície até o núcleo dos dentes das engrenagens (ver Fig. 19, 20 e 21).

Figura 16. Amostra 1: escala de 200µm, ampliação 40X.



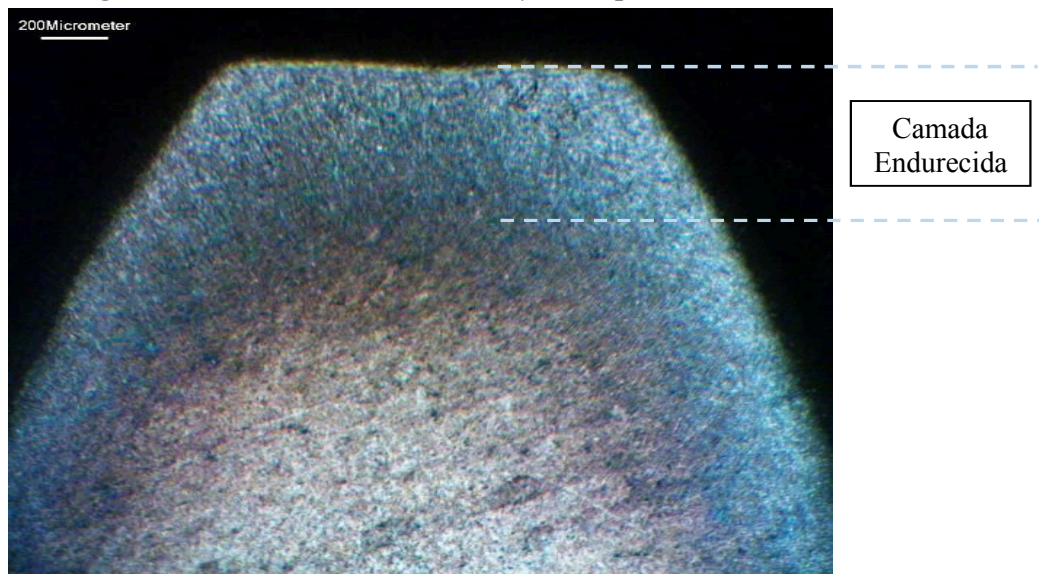
Fonte: Autora (2017)

Figura 17. Amostra 2: escala de 200 μ m, ampliação 40X.



Fonte: Autora (2017)

Figura 18. Amostra 3: escala de 200 μ m, ampliação 40X.



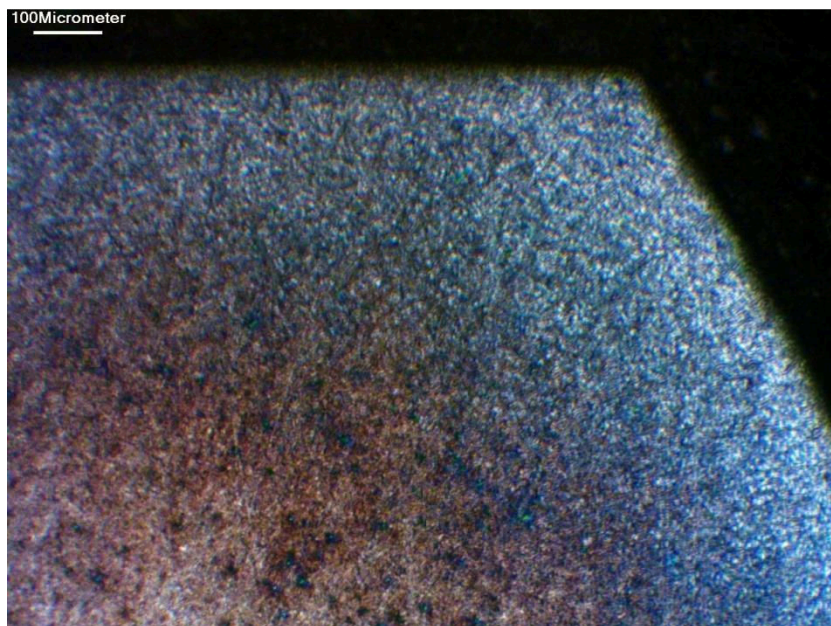
Fonte: Autora (2017)

Figura 19. Amostra 1: escala de 100 μ m, ampliação 100X.



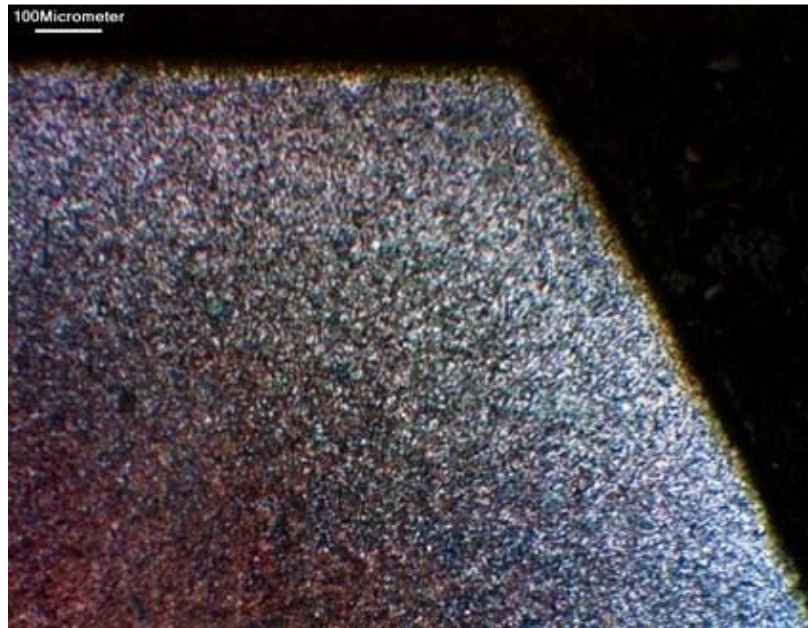
Fonte: Autora (2017)

Figura 20. Amostra 2: escala de 100 μ m, ampliação 100X.



Fonte: Autora (2017)

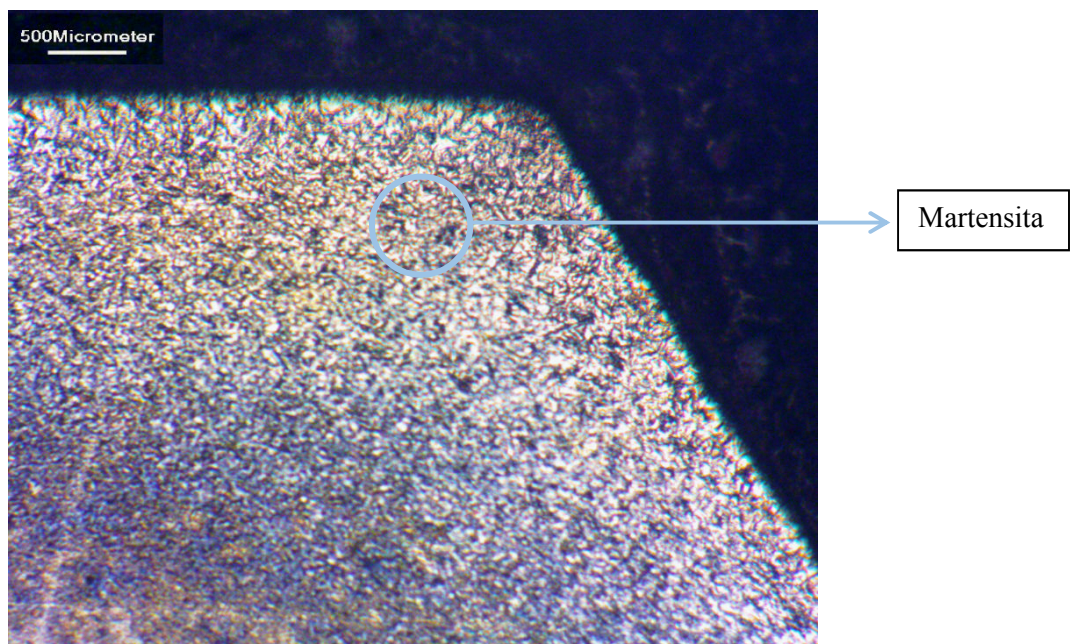
Figura 21. Amostra 3: escala de 100 μ m, ampliação 100X.



Fonte: Autora (2017)

As micrografias mostradas nas Fig. 22, 23 e 24 foram obtidas com ampliação 200X nas mesmas regiões analisadas anteriormente, sendo relacionadas às amostras 1, 2 e 3. Nas micrografias exibidas nas Fig. 25, 26 e 27 há imagens ampliadas em 400X para aquelas regiões vistas com ampliação 200X, respeitando-se a sequência das amostras 1, 2 e 3. Houve formação de uma microestrutura tipicamente martensítica, que se estende da superfície ao interior dos dentes das engrenagens como visto nas imagens.

Figura 22. Amostra 1: escala de 500 μ m, ampliação 200X.



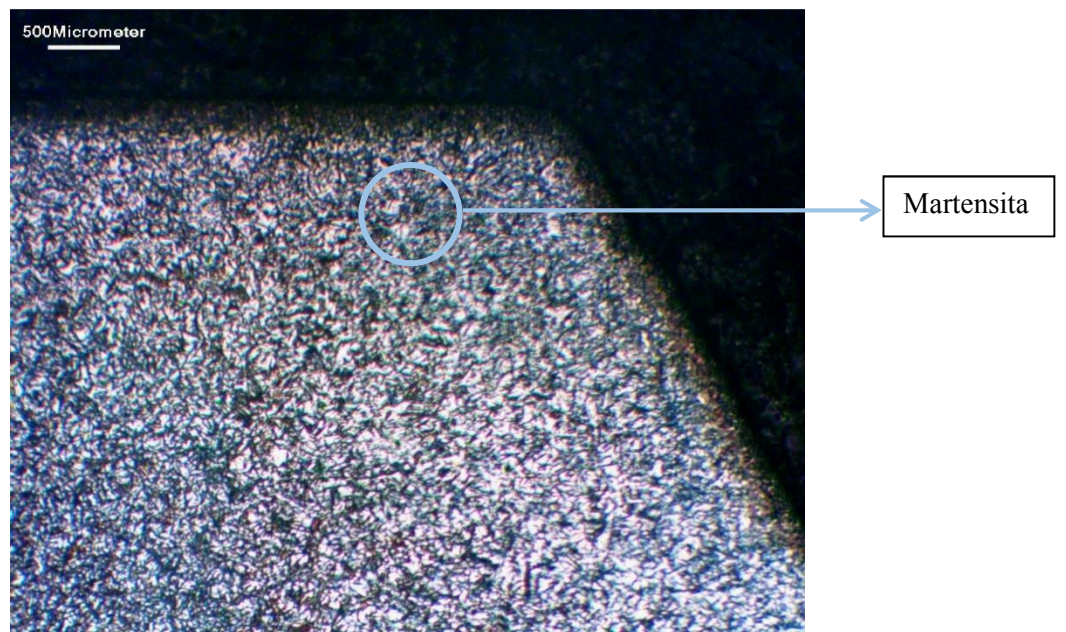
Fonte: Autora (2017)

Figura 23. Amostra 2: escala de 500 μ m, ampliação 200X.



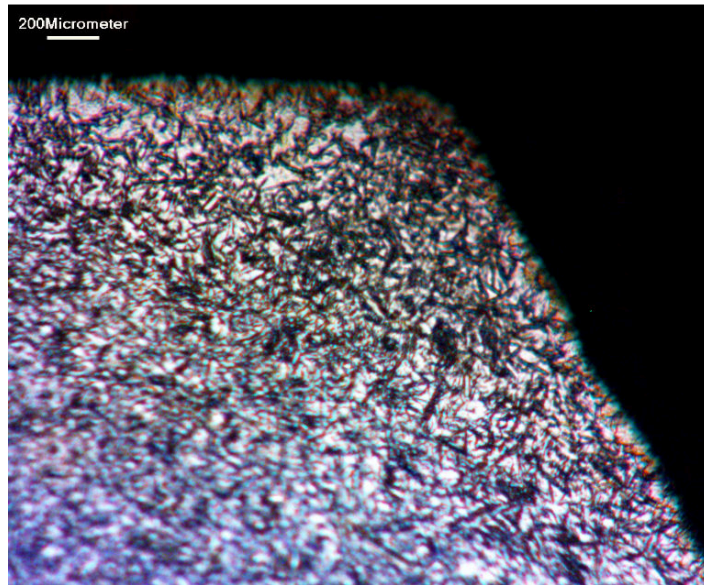
Fonte: Autora (2017)

Figura 24. Amostra 3: escala de 500 μ m, ampliação 200X.



Fonte: Autora (2017)

Figura 25. Amostra 1: escala de 200 μ m, ampliação 400X.



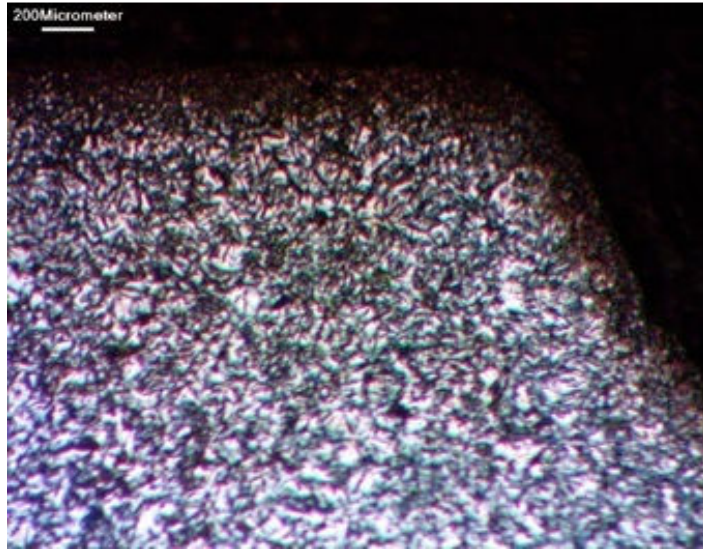
Fonte: Autora (2017)

Figura 26. Amostra 2: escala de 200 μ m, ampliação 400X.



Fonte: Autora (2017)

Figura 27. Amostra 3: escala de 200 μ m, ampliação 400X.



Fonte: Autora (2017)

Nas três amostras analisadas houve uma nítida zona de transição na microestrutura, provavelmente devido à queda gradual no teor de carbono – no sentido da superfície para o núcleo do dente da engrenagem. É importante que esta zona de transição entre a camada cementada e o núcleo do componente seja gradual, a fim de que a camada endurecida seja suportada por um núcleo mais dúctil. Este fato aumenta a durabilidade e confiabilidade de peças cementadas.

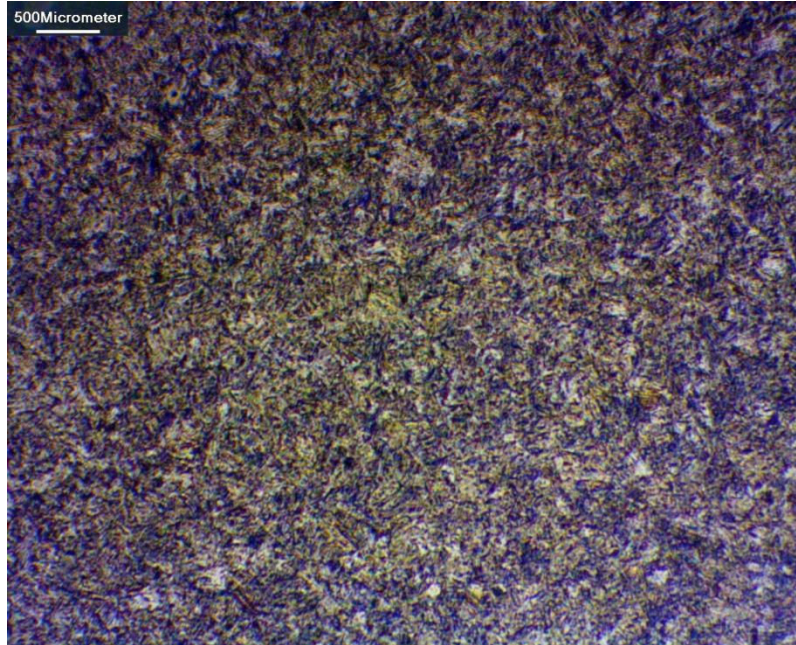
A microestrutura formada na camada cementada é predominantemente composta de martensita, possivelmente devido aos diferentes teores de carbono partindo-se da superfície em direção ao núcleo do dente. Possivelmente, há algum percentual de austenita retida na camada cementada, pois segundo Chiaverini (2002) quando na execução do processo de têmpera direta em óleo – sobretudo para aços com altos teores de elementos de liga – existe a tendência de ocorrer retenção de austenita na microestrutura final.

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

Na Figura 28 é apresentada uma microestrutura martensítica, que foi obtida no meio do dente da engrenagem cementada da amostra 1. Esta microestrutura foi similar àquela verificada também na mesma região para as amostras 2 e 3. Notou-se que tal microestrutura analisada se distingue parcialmente daquela vista na extremidade do dente, onde a martensita

acicular está mais evidente para visualização. Isto se deve pelo fato de, teoricamente, haver menor teor de carbono no núcleo do que na camada cementada.

Figura 28. Amostra 1: meio do dente da engrenagem, escala de 500 μ m, ampliação 200X.



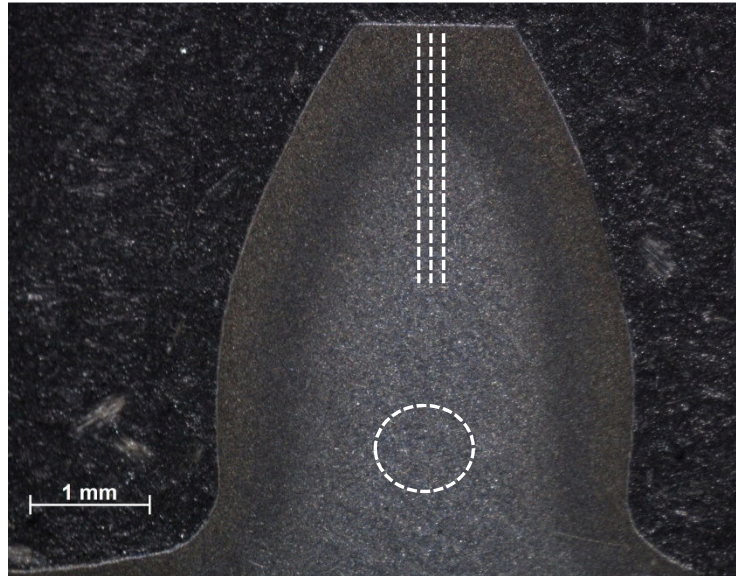
Fonte: Autora (2017)

4.2 Perfis de Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados em um dente de engrenagem por amostra, iniciados a partir da superfície do dente até 3,0 mm de profundidade. Utilizou-se a escala de dureza Rockwell C (HRC) e carregamento de 300 gf por 10 s. Foram feitos três perfis de microdureza em cada dente com as indentações igualmente espaçadas de 0,10 mm (100 μ m) entre si, para que pudessem ser obtidos a média e o desvio padrão dos resultados. Os pontos obtidos nos gráficos resultaram da média aritmética de três medições em cada seção analisada na região endurecida.

A Figura 29 indica os locais das medições dos perfis de microdureza e também numa região central junto à base do dente (região circulada em branco nesta figura), onde foram realizadas cinco medições e calculados a média e o desvio padrão.

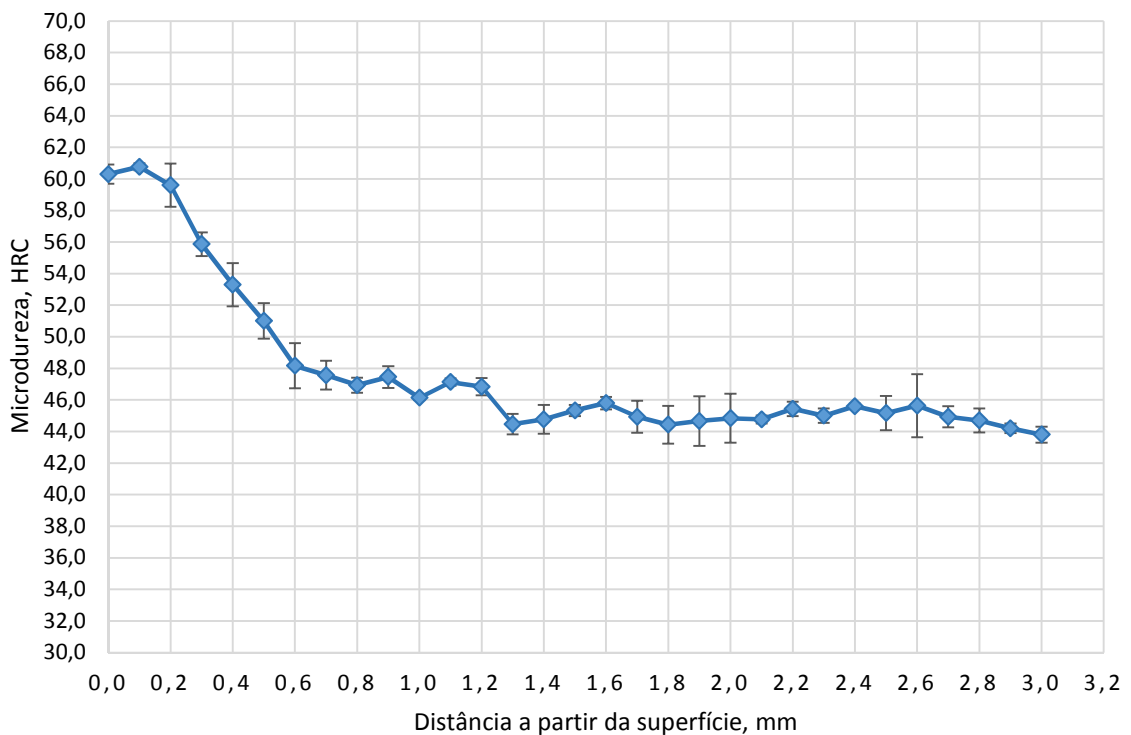
Figura 29. Esquematização dos perfis de microdureza e numa região na base dos dentes.



Fonte: Autora (2017)

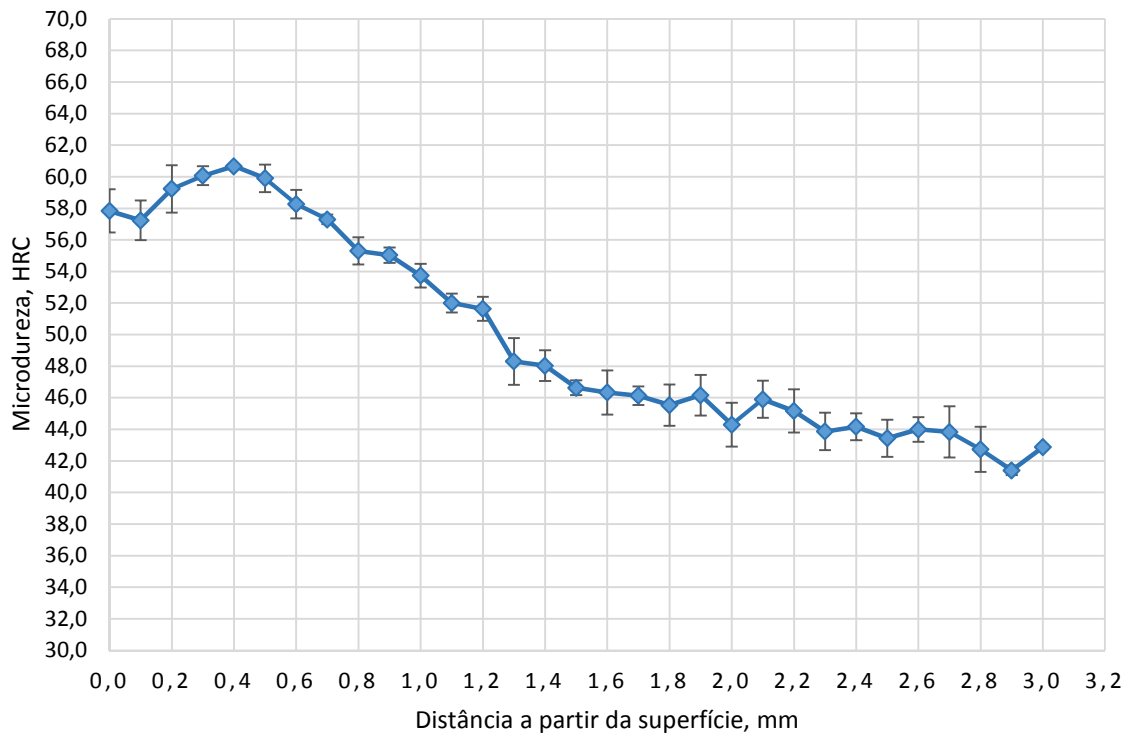
As Figuras 30, 31 e 32 que seguem apresentam os gráficos dos perfis de microdureza na escala HRC executados nas amostras 1, 2 e 3, respectivamente. Partiu-se da premissa de que, uma região endurecida por cementação a partir da superfície da peça deve atingir um valor de dureza de, no mínimo, 50HRC como visto no gráfico da Fig. 33 (HOSSEINI, 2012).

Figura 30. Perfil de microdureza HRC na amostra 1.



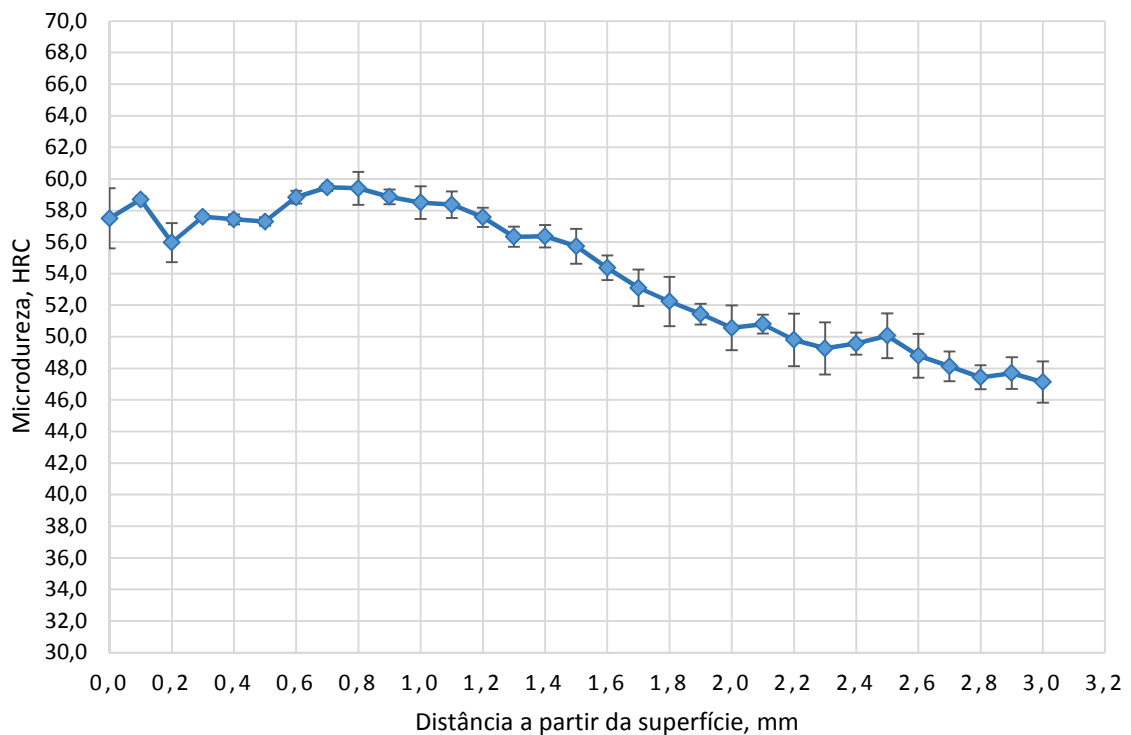
Fonte: Autora (2017)

Figura 31. Perfil de microdureza HRC na amostra 2.



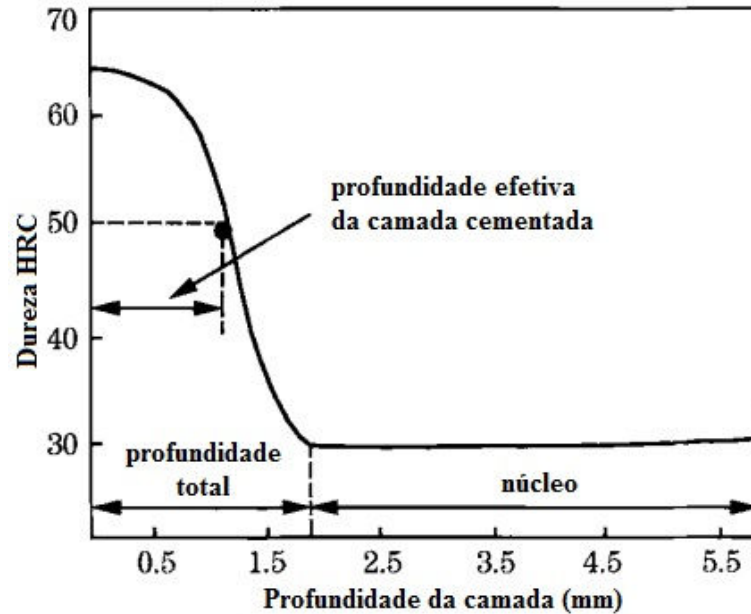
Fonte: Autora (2017)

Figura 32. Perfil de microdureza HRC na amostra 3.



Fonte: Autora (2017)

Figura 33. Diagrama esquemático da profundidade da camada cementada (adaptado do original).



Fonte: Hosseini (2012)

Baseado no entendimento da premissa anterior, de que a camada cementada se estende da superfície da peça à uma profundidade onde a dureza é de 50 HRC (ver Fig. 33), notou-se que as amostras 1, 2 e 3 obtiveram espessuras de camada cementada em torno de 0,5 mm, 1,3 mm e 2,2 mm, respectivamente. A dureza máxima obtida na amostra 1 foi de 60,76 HRC a 0,1 mm a partir da superfície; na amostra 2 foi de 60,67 HRC a 0,4 mm; e na amostra 3 foi de 59,46 HRC a 0,7 mm. Os valores do perfil de microdureza podem ser influenciados pelo tempo de revenimento, que podem gerar diferentes valores de dureza em determinadas profundidades da camada endurecida.

Os cálculos de difusão foram feitos para uma camada cementada de 0,40 mm, sendo que a profundidade recomendada da camada cementada para engrenagens de módulo maior ou igual 2 e menor do que 2,5 está na faixa de 0,40 a 0,60 mm. Portanto, somente a amostra 1 ficou dentro do limite estipulado para esta profundidade de camada. As amostras 2 e 3 excederam esse limite, ou seja, houve uma difusão de carbono relativamente excessiva. Tal fato tende a provocar alguma perda de tenacidade e tornar os dentes das engrenagens mais suscetíveis a fraturas ou trincamento em serviço.

As amostras 2 e 3 exibiram dureza pouco inferior nas primeiras medições, comparativamente ao que foi verificado para a amostra 1. Isto se deu, possivelmente, devido à proximidade destas indentações junto à baquelite, aliado à possibilidade de haver alguma austenita retida justamente nestas regiões de medição. A amostra 3 exibiu uma descontinuidade nos valores de dureza, variando de 58,7 HRC na profundidade de 0,1 mm

para 55,96 HRC em 0,2 mm; a partir daí, estes valores se estabilizaram até sua dureza máxima e foram gradualmente sendo obtidos menores valores de dureza até 3,0 mm.

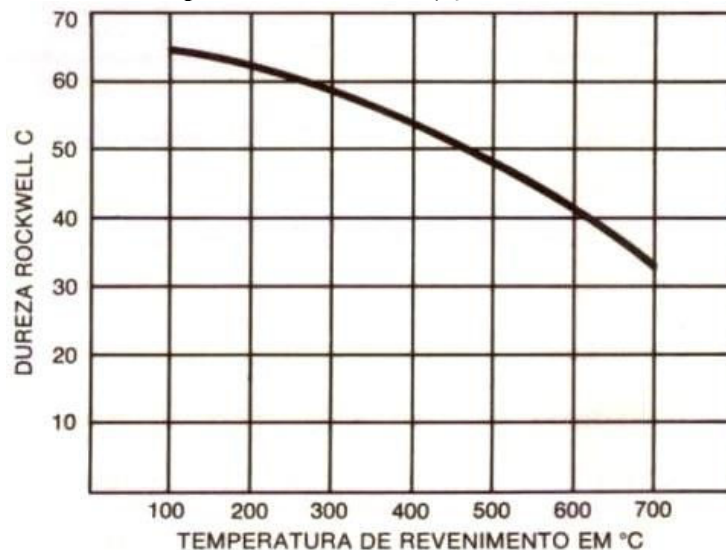
O gráfico do perfil de microdureza da amostra 3 apresentou uma queda bem suave, condição que seria ideal segundo a literatura. Entretanto, os valores de dureza mantiveram-se relativamente altos até próximo ao núcleo do dente e excedendo bastante a faixa de 0,40-0,60 mm indicada para cementação de engrenagens de módulo 2. Quanto ao gráfico da amostra 2 este também mostrou uma transição gradual, mas foi igualmente excedida a profundidade estimada da camada cementada. Ainda nestes quesitos, os resultados da amostra 1 foram considerados os mais satisfatórios quanto à dureza superficial e à profundidade de camada.

Cinco medidas de microdureza foram feitas numa região no interior e junto à base do dente (como indicado na Fig. 29) para cada amostra. Os valores obtidos para a média e o desvio-padrão foram os seguintes:

- amostra 1: dureza = $40,42 \pm 1,29$ HRC
- amostra 2: dureza = $40,48 \pm 1,61$ HRC
- amostra 3: dureza = $39,00 \pm 1,09$ HRC

O diagrama de revenimento mostrado na Fig. 34 mostra a dureza obtida em corpos de prova de aço SAE 4320, de dimensões Ø22 mm x 10 mm, cementados em banho de sal, e temperados diretamente em óleo e revenidos por 2 horas nas temperaturas indicadas. Nesse caso, a dureza esperada para o revenimento a 200°C é de aproximadamente 62 HRC. No presente trabalho, foram obtidos níveis de dureza próximos a este valor na região de profundidade estimada da camada endurecida, mesmo tendo sido utilizada cementação sólida.

Figura 34. Diagrama de revenimento da camada cementada em banho de sal, têmpera direta em óleo e revenimento por 2 horas nas temperaturas indicadas (aço SAE 4320, amostras Ø22mm x 10mm).



Fonte: Aços Villares S.A. – catálogo técnico.

5. CONCLUSÕES

A aplicabilidade da segunda Lei de Fick foi satisfatória apenas na primeira condição investigada, mesmo se tratando do processo de cementação sólida. Nas outras duas condições, a profundidade da camada cementada excedeu bastante o valor fixado de 0,40 mm usado nos cálculos de difusão.

Houve dificuldade de se obter uma camada de espessura homogênea no perfil do dente cementado para tempos de forno maiores do que 2,4 h (tempo para amostra 1). Nas amostras 2 e 3, que ficaram mais tempo no forno, notou-se que na parte superior do dente essa camada foi um pouco mais espessa do que na região do vale entre os dentes. A região no topo do dente ficou livremente exposta ao meio carburante, resultando possivelmente numa difusão mais intensa nesta região do que na região entre dentes (principalmente na base).

A análise metalográfica constatou a formação de uma microestrutura tipicamente martensítica na camada cementada em todas as amostras analisadas, sendo também observada uma região de transição entre esta e o núcleo do dente da engrenagem. Nesta última região, a microestrutura martensítica não ficou tão nítida como aquela na camada cementada.

Os perfis de microdureza efetuados nas três amostras comprovaram a formação de uma camada cementada, que se estende da superfície ao núcleo do dente da engrenagem até uma região com valor de dureza 50 HRC.

A dureza superficial esperada, baseada na literatura técnica consultada, após a etapa de revenimento era de aproximadamente 62 HRC. Neste quesito, a amostra 1 foi a que mais se aproximou deste valor com 60,8 HRC para uma profundidade em torno de 0,1 mm da superfície do dente. Vale ressaltar que, na amostra 1 foram atingidos valores de dureza acima de 50 HRC até a profundidade de 0,4 mm. A amostra 2 apresentou um valor máximo de dureza de 60,7 HRC na profundidade em torno de 0,4 mm, enquanto que a amostra nº 3 um valor máximo de 59,5 HRC a cerca de 0,7 mm de profundidade.

O gráfico do perfil de microdureza da amostra 3 apresentou uma transição bem suave na queda de dureza em comparação às outras duas amostras; entretanto, estes valores permaneceram altos até próximo ao núcleo do dente e excederam bastante a faixa de 0,40-0,60 mm indicada para engrenagens de módulo 2. Isto ocorreu em consequência da alta difusão de carbono para o interior das engrenagens, devido ao maior tempo de exposição no processo de cementação. O gráfico da amostra 2 também mostrou uma transição gradual, mas foi igualmente excedida a profundidade estimada para a camada cementada.

Os resultados mais satisfatórios na cementação sólida da engrenagem fabricada de aço SAE 4320 foram obtidos para as condições testadas na amostra 1. Tais resultados exibiram valores de dureza acima de 50 HRC, justamente, na profundidade da camada cementada indicada para uma engrenagem de módulo 2, além de uma transição gradual na queda de dureza a partir da superfície para o núcleo do dente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Abaixo são apresentadas sugestões para futuros trabalhos de conclusão de curso, os quais poderão investigar melhorias na linha de estudo e pesquisa no referido tema:

- Manter as mesmas condições operacionais usadas neste trabalho, porém aumentar a temperatura do forno para 1100°C – o novo valor do coeficiente de difusão do carbono na austenita seria maior e com isto seria necessário um menor tempo de cementação;
- Manter as mesmas condições operacionais neste trabalho, porém empregando-se uma caixa de cementação sólida por amostra. Desta forma, pretende-se evitar a abertura da tampa da caixa antes do fim do tratamento termoquímico nas amostras. Além disso, buscar-se-á evitar o escape parcial da atmosfera rica em carbono para o ambiente – fato que possivelmente diminui o potencial químico do meio carburante;
- Manter iguais condições operacionais usadas neste trabalho, porém diminuindo o tempo de revenimento para 30 minutos. Isto porque a recomendação para o tempo de revenimento, baseado na literatura técnica, para peças cementadas com espessura de 12,5 mm está entre 30 e 60 minutos;
- Investigar a presença de austenita retida na microestrutura da camada cementada, utilizando-se ampliações acima de 400X no microscópio óptico.
- 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 da superfície dos dentes. Logo, pretende-se comparar estes resultados com as porcentagens teóricas usadas na fórmula da segunda lei de Fick e, desta forma, assegurando ou não a aplicabilidade desta lei quanto ao teor de carbono na camada cementada para o tratamento de cementação sólida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AÇOS VILLARES S.A. Aços para Construção Mecânica – aços para cementação. Catálogo técnico, p. 12-15.
- CALLISTER Jr., W. D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, p. 97, 1998.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2002.
- COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Revisão de André Luiz V. da Costa e Silva. 4. ed. rev. atual. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- DAVIS, J. R. Surface Hardening of Steel. ASM International, p. 118, 2002. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=eIfcHJtv_kcC&printsec=frontcover&dq=DAVIS,+J.+R.+Surface+Hardening+of+Steel.+ASM+International&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwidq6uxy83XAhUCDZAKHV3RBXwQ6AEIJjAA#v=onepage&q=DAVIS%2C%20J.%20R.%20Surface%20Hardening%20of%20Steel.%20ASM%20International&f=false> Acesso em: 25 ago. 2017.
- DAVIS, J. R *et al.* Gear Materials, Properties, and Manufacture. ASM International, 2005.
- FISCHER, Ulrich *et al.* **Manual de tecnologia metal mecânica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- HOSSEINI, S. R. E. *Simulation of Case Depth of Cementation Steels According to Fick's Laws*. **Journal Of Iron and Steel Research**, v. 19, n. 11, p.71-78, nov. 2012.
- KOWSER, A.; MOTALLEB, A. *Effect of Quenching Medium on Hardness of Carburized Low Carbon Steel for Manufacturing of Spindle used in Spinning Mill*. **Procedia Engineering**, v. 105, p.814-820, 2015.
- KRAUSS, G. *Steels: Heat treatment and processing principles*. **ASM International**, p.286, 1990.
- LAMPMAN, S. *Introduction to Surface Hardening of Steels*. Heat Treating, Vol. 4, ASM Handbook, **ASM International**, vol. 4A, p.259–267, 1991. Revised by Michael J. Schneider, and Madhu S. Chatterjee. Disponível em: <<http://asminternational.org>> Acesso em: ago.2017.
- MAZZO, Norberto. **Engrenagens cilíndricas: da concepção à fabricação**. São Paulo: Blucher, 2013. p. 793 - 795.
- MEI, P. R.; COSTA e SILVA, A. L. V. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- MONTEIRO, Sergio Neves. **Materiais para Engenharia**. Apostila do curso de graduação

em Engenharia Metalúrgica / UFRJ, 1992.

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

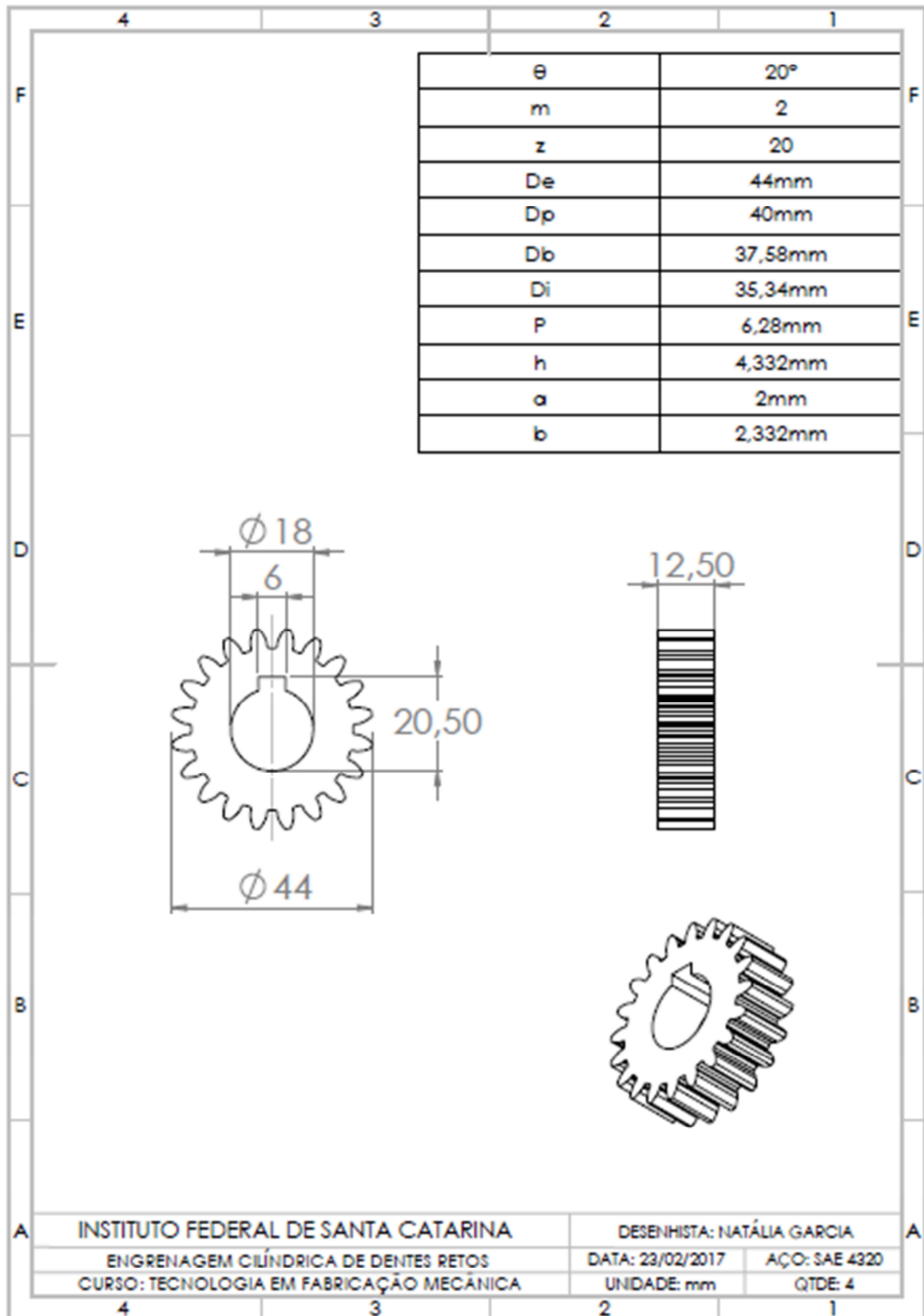
SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos:** fundamentos teóricos e práticos. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

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

Disponível em: <<http://www.mechnol.com>> Acesso em: 12 abr. 2017

Disponível em: <<http://www.anvisa.gov.br/datavisa/Substancia/CodigoCAS.htm>> Acesso em: 17 ago. 2017

APÊNDICE A – Desenho esquemático das engrenagens cilíndricas de dentes retos fabricadas neste trabalho.



Fonte: Autora (2017)