

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FELIPE YOSHIMI GONÇALVES KITAMURA

**CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 1020**

GUARAPUAVA

2023

FELIPE YOSHIMI GONÇALVES KITAMURA

CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 1020

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carla Dantas da Silva
Coorientador: Lucas Franco Wrege

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FELIPE YOSHIMI GONÇALVES KITAMURA

**CEMENTAÇÃO SÓLIDA EM ENGRENAGENS CILÍNDRICAS
DE DENTES RETOS DE AÇO SAE 1020**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26/junho/2023

Carla Dantas da Silva
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Denise Alves Ramalho
Doutora em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sergio Dalmas
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

Dedico este trabalho à minha família, por toda
dedicação, suporte e amor desde sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar meu caminho, me iluminar e me capacitar para a realização dos meus objetivos, sem ele nada é possível.

Meus agradecimentos mais sinceros a razão de todo esse trabalho, de toda essa trajetória: meus pais, Wilson Kitamura e Maria Kitamura, os quais serei eternamente grato por não medirem esforços, abdicarem dos seus próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Sem vocês nada disso seria possível, não existem palavras para expressar meu amor e minha eterna gratidão a vocês. Por vocês, para vocês. Sempre.

Agradeço também aos meus irmãos Willian e Leonardo que sempre me apoiaram e nunca deixaram de acreditar no meu potencial.

Gostaria de dedicar esse trabalho as minhas duas estrelas que guiam meu caminho, minha vó Julia (in memorian) e minha eterna Madida tia Nirda (in memorian) que nunca esconderam o orgulho e o amor que tinham para comigo.

Gostaria de agradecer também os meus amigos, os quais tenho privilégio de poder chamar de irmãos, Bruno Murat, Pedro Telles, Gilmar Lejambre Junior e Luiz Felipe Rolim que sempre acreditaram, me apoiaram quando necessário e fizeram e fazem parte dessa importante fase de minha vida. Agradeço por serem exemplos reais da palavra amigo.

Agradeço imensamente a minha orientadora, a Profa. Dra. Carla Dantas da Silva, pelo suporte, apoio e dedicação na trajetória desse trabalho. Muito grato pela orientação e por todos os ensinamentos durante a graduação.

Agradeço também ao meu Coorientador Lucas Franco Wrege por todo o auxílio na parte experimental desse trabalho, sempre disposto a colaborar e contribuir com seu conhecimento.

Meus agradecimentos aos professores do departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR – Guarapuava por todo ensinamento e dedicação ao longo da graduação, todo meu respeito e minha admiração por esse ato tão nobre que é ser ensinar.

RESUMO

A cementação sólida é um tratamento termoquímico empregado em ligas ferrosas e tem como principal objetivo promover o endurecimento superficial dos aços. As engrenagens são elementos do meio industrial metal mecânica que passam pelo processo de cementação, obtendo maior resistência ao desgaste na região dos dentes, enquanto o núcleo mantém a sua ductilidade. O endurecimento ocorre através do fenômeno da difusão, devido a austenização da peça, que então promove a absorção do carbono pela superfície do aço. O presente estudo propôs analisar a dureza e a microestrutura de engrenagens do tipo cilíndrica de dentes retos, de aço SAE 1020, antes e depois de passar pelo processo de cementação sólida. Neste contexto, foram realizadas análises metalográficas e de perfil de dureza com o objetivo de verificar as alterações nas propriedades mecânicas antes e depois deste tratamento termoquímico.

Palavras-chave: cementação sólida; engrenagens; aço SAE 1020; ensaios mecânicos.

ABSTRACT

Pack carburizing is a thermochemical treatment used in ferrous alloys and its main objective is to promote the surface hardening of steels. Gears are elements of the metal-mechanical industrial environment that go through the carburizing process obtaining greater wear resistance in the region of the teeth while the core maintains its ductility, the movement is carried out through the diffusion process, due to austenization of the part, which then promotes the absorption of carbon to the steel. The present study proposed to analyze the hardness and the microstructure of a cylindrical spur gear, made of SAE 1020 steel, before and after going through the solid carburizing process. In this context, metallographic and hardness profile analyzes were carried out in order to verify changes in mechanical properties before and after thermochemical treatments.

Keywords: pack carburizing; gear; SAE 1020 steel; mechanical assay.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de fases ferro-carbono de ferro	16
Figura 2 – Difusão por lacunas	18
Figura 3 - Difusão intersticial	8
Figura 4 - Influência da temperatura e tempo na penetração superficial	20
Figura 5 - Engrenagem cilíndrica de dentes retos	24
Figura 6 - Representação dos pontos de medição na engrenagem.....	27
Figura 7 - Gráfico perfil de dureza (HV) antes da cementação.....	33
Figura 8 - Gráfico perfil de dureza (HV) depois da cementação.	33
Figura 9 - Gráfico das microdurezas antes e após cementação.....	34
Fotografia 1 - Cortadora metalográfica CM40/60	25
Fotografia 2 -Forno Mufla	26
Fotografia 3 - Microdurômetro de bancada para dureza Rockwell Digimess	26
Fotografia 4 - Lixadeira metalográfica manual de 4 pistas LM04.....	27
Fotografia 5 - Lixadeira politriz metalográfica PL02E	28
Fotografia 6 - Microscópio Olympus BX51	28
Fotografia 7 - Macrografia da amostra cementada	29
Fotografia 8 - Micrografia região cementada em escala 10 μm , ampliação 5X ..	30
Fotografia 9 - Micrografia da transição em escala 10 μm , ampliação 50X.....	31
Fotografia 10 - Micrografia do núcleo em escala 10 μm , ampliação 100X.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1020	17
Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1020	17
Tabela 3 - Valores de microdureza antes do processo de cementação.....	32
Tabela 4 - Valores de microdureza depois do processo de cementação.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SAE	Sociedade dos engenheiros automotivos (do inglês – <i>Society of Automotive Engineers</i>)
HRB	Escala de Dureza Rockwell B

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Fe</i>	Elemento químico ferro
<i>S</i>	Elemento químico enxofre
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>FE₃CO</i>	Carboneto de ferro (Cementita)
<i>Mn</i>	Elemento químico manganês
<i>Si</i>	Elemento químico silício
<i>P</i>	Elemento químico fósforo
<i>C</i>	Elemento químico carbono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivos específicos.....	14
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Definições do aço.....	16
2.2	Aço sae 1020.....	16
2.3	Difusão	17
2.4	Tratamentos termoquímicos	19
2.5	Cementação	19
2.6	Tipos de cementação	21
2.7	Engrenagens.....	22
2.8	Tipos de engrenagens	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Local do experimento	25
3.2	Obtenção de materiais	25
3.3	Metodologia	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Análise por macrografia	29
4.2	Análise por micrografia	29
4.3	Perfil de microdureza	32
5	CONCLUSÕES	35
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	36
7	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A seleção de ferramentas e peças a serem destinadas para determinada função devem levar em consideração alguns aspectos importantes, entre eles as propriedades mecânicas que devem possuir para desempenhar a função de maneira correta com a durabilidade e segurança desejadas. As ligas ferrosas apresentam uma importante aplicação na indústria metal/mecânica justamente pela sua flexibilidade em, através de diversos processos de fabricação (conformação mecânica, fundição, entre outros...), junto com tratamentos térmicos e termoquímicos, se adequar a determinada propriedade mecânica desejada (GARCIA, 2017).

As engrenagens são elementos mecânicos empregados para transmitir movimentos entre eixos através da ação de engrenamento (encaixe adequado dos dentes durante a rotação promovendo a movimentação). A engrenagem cilíndrica de dentes retos é um dos tipos de engrenagens mais empregados na indústria devido a sua aplicação (transmissão de movimento circular contínuo entre eixos paralelos) e suas características (alta precisão, durabilidade e fácil manutenção). As propriedades mecânicas requeridas por esse tipo de elemento mecânico são: elevada resistência à flexão e compressão, a manutenção de um núcleo dúctil e tenaz para amortecimento de impactos, assim como resistência ao desgaste na região do contato dos dentes (DAVIS, 2005).

A cementação sólida (ou em caixa) é o processo termoquímico mais usual no qual são submetidas as engrenagens, a fim de se obter as propriedades mecânicas citadas. O processo de cementação sólida consiste na difusão de carbono na camada superficial da peça promovendo um aumento da dureza do material (em uma fina camada) enquanto seu núcleo permanece dúctil e tenaz (CHIAVERINI, 1988). O processo de cementação é essencial para aumentar a confiabilidade e a durabilidade de engrenagens.

1.1 Objetivos

O presente trabalho priorizou o estudo da cementação sólida em caixa e apresenta como objetivo geral a realização do procedimento de cementação sólida em uma engrenagem de aço SAE 1020, bem como a análise das alterações das propriedades mecânicas pós tratamento termoquímico.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente estudo foram:

- Realizar o processo de cementação sólida no aço SAE 1020;
- Analisar a microestrutura do material após o processo de cementação;
- Identificar a formação da camada cementada na superfície dos dentes cementados;
- Avaliar a dureza da peça antes e depois do tratamento termoquímico.

1.2 Justificativa

O estudo científico contribuiu para os conhecimentos a respeito de elementos mecânicos e como é possível aprimorá-los através de processos, como tratamentos termoquímicos, com o objetivo de aumentar sua confiabilidade, durabilidade e segurança uma vez que são elementos essenciais para o funcionamento de equipamentos em diversos processos.

As engrenagens cilíndricas de dentes retos são muito utilizadas e a escolha do material a ser fabricado é uma etapa crucial do processo pois é preciso considerar aspectos como a resistência e as condições de serviço (como ruído e desgaste). O aço SAE 1020 é um dos aços mais utilizados na fabricação de engrenagens, porém, por ser um aço classificado como de baixo carbono, apresenta um valor de dureza Rockwell (HRB) muito abaixo do desejado para as operações em que esses elementos são empregados (aproximadamente 68 HRB). Com isso, é necessária a realização de tratamentos termoquímicos como: cementação, nitretação e cianetação visando o aumento da resistência principalmente na região dos dentes, considerada uma região de altas tensões em razão da pressão de contato e a magnitude cíclica por fadiga (KODA, 2009).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definições do aço

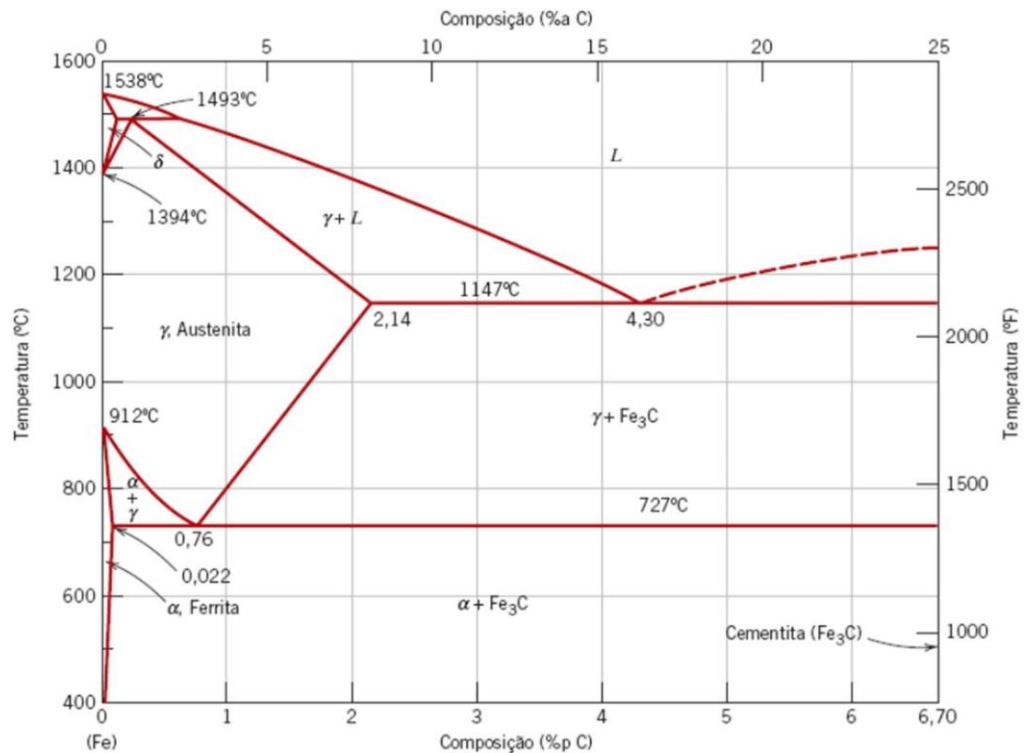
De acordo com Chiaverini (2005), aço é uma liga de ferro-carbono que contém, geralmente, entre 0,008% até 2,11% de carbono com a presença de elementos residuais proveniente dos processos de fabricação. Os elementos secundários presentes junto ao carbono e o ferro são basicamente: Silício (Si), enxofre (S), Manganês (Mn) e fósforo (P) resíduos oriundos do processo de fabricação (CHIAVERINI, 2005).

Diferente de muitos elementos existentes, o aço possui uma certa complexidade envolvida em sua natureza devido a esses elementos adicionados ao seu processo de fabricação. Sendo assim, a sua composição não é tão simples pois, esses elementos alteram a sua microestrutura e, conseqüentemente as suas propriedades mecânicas.

A Figura 1 a seguir, representa o diagrama de equilíbrio ferro-carbono, uma importante ferramenta para os conhecimentos dos aços, com teor de carbono de até 6,7%, o motivo desse valor é que acima desse teor existe uma escassez de informações além da baixa importância comercial. O diagrama fornece informações importantes como:

- ✓ As fases do ferro e do carbono como: ferro gama, ferrita (ferro alfa), austenita (fase sólida), cementita (carboneto de ferro);
- ✓ ponto de fusão do ferro puro (1538 °C) e o ponto de fusão do carboneto de ferro, cementita (Fe_3C);
- ✓ a parte superior do diagrama corresponde as reações de passagem do estado líquido ao sólido enquanto que a parte inferior corresponde as reações que ocorrem no estado sólido;
- ✓ a linha horizontal com a temperatura de 1147 °C indica o ponto com menor solidificação, liga eutética com composição de 4,3% de carbono;

Figura 1 - Diagrama de fases ferro-carbeto de ferro



Fonte: CALLISTER (2018).

Os componentes básicos dos aços e suas propriedades características são: austenita (solução sólida de carbono e ferro gama com boa resistência mecânica e tenacidade), ferrita (ferro no estado alfa, apresenta baixa dureza e baixa resistência a tração), perlita (mistura de ferrita com cementita na forma de lâminas finas com um misto das propriedades dos componentes) e cementita (carboneto de ferro com elevada dureza) (CHIAVERINI 2018).

2.2 Aço SAE 1020

O aço SAE 1020 é muito empregado no processo de cementação e sua escolha é justificada em razão do seu custo-benefício, além da sua excelente conformabilidade, usinabilidade e também menor tendência em formar pontos moles (CHIAVERINI, 2008).

Em relação a sua composição química, o aço SAE 1020 é composto por carbono (C), Manganês (Mn), Fósforo (P) e enxofre (S) conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço SAE 1020

Elemento	Carbono	Ferro	Manganês	Enxofre (máx)	Fósforo (máx)
Concentração (% em massa)	0,18 – 0,23	0,08 – 0,43	0,30 – 0,60	0,05	0,04

Fonte: Manual dos aços (2020).

A Tabela 2 abaixo exhibe as propriedades mecânicas do aço SAE 1020

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do aço SAE 1020

Densidade (g/cm ³)	7,87
Resistência a tração (Mpa)	420
Limite de escoamento (Mpa)	350
Dureza Rockwell (HB)	68
Dureza Brinell	121

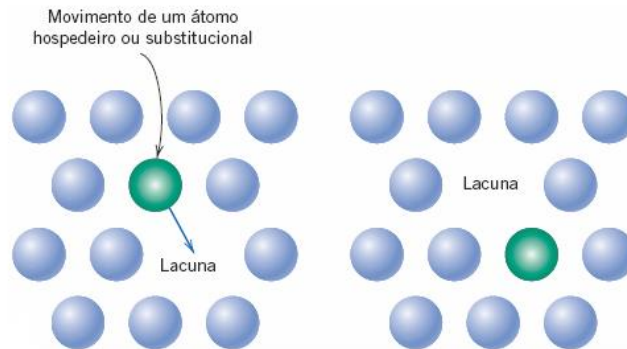
Fonte: Adaptado de SOUSA (1982).

2.3 Difusão

A difusão é um fenômeno de transporte de matéria realizado no interior tanto de materiais sólidos como líquidos e gasosos em que consiste no movimento de migração de átomos, presentes na estrutura cristalina, de uma região para outra desde que existam regiões vazias e energia vibracional por parte dos átomos para realizar o deslocamento, a distorção criada na rede possibilita a ocorrência do fenômeno (CALLISTER, 2002). Existem dois mecanismos principais de difusão: difusão por lacunas e a difusão intersticial.

- ✓ Difusão por lacunas: é o movimento em que ocorre a troca de posição entre os átomos em difusão e as lacunas ou vaga adjacente presente na estrutura (movimento em direções opostas de um em relação ao outro). Conforme Figura 2.

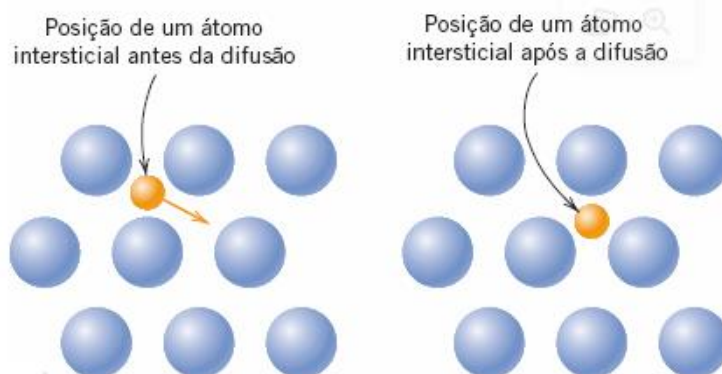
Figura 2 – Difusão por lacunas



Fonte: CALLISTER (2014).

- ✓ Difusão intersticial: neste tipo de difusão há o movimento de átomos intersticiais buscando preencher uma posição intersticial vizinha vazia. Tratando-se de ligas metálicas a difusão intersticial acaba por ser mais rápida por conta de os átomos intersticiais serem menores e, conseqüentemente, mais rápidos. Outro fator que contribui para uma maior ocorrência é a existência de um número maior de espaços intersticiais do que lacunas (CALLISTER, 2014). Esse tipo de difusão é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Difusão intersticial



Fonte: CALLISTER (2014).

O fenômeno da difusão é influenciado por dois fatores:

- ✓ A temperatura, que influencia no coeficiente e taxas de difusão, e contribui no aumento da energia vibracional dos átomos, o que, por sua vez, permite a realização da migração.
- ✓ A espécie em difusão devido ao valor do coeficiente de difusão (taxa a qual os átomos se difundem) ser influenciado pelo material que está sofrendo o processo (CALLISTER, 2014).

2.4 Tratamentos termoquímicos

Tratamentos termoquímicos são processos realizados que buscam aumentar o endurecimento da camada superficial gerando maior resistência ao desgaste, enquanto o núcleo permanece dúctil, através da adição de elementos como: carbono, nitrogênio ou boro pelo fenômeno da difusão (CHIAVERINI, 2008).

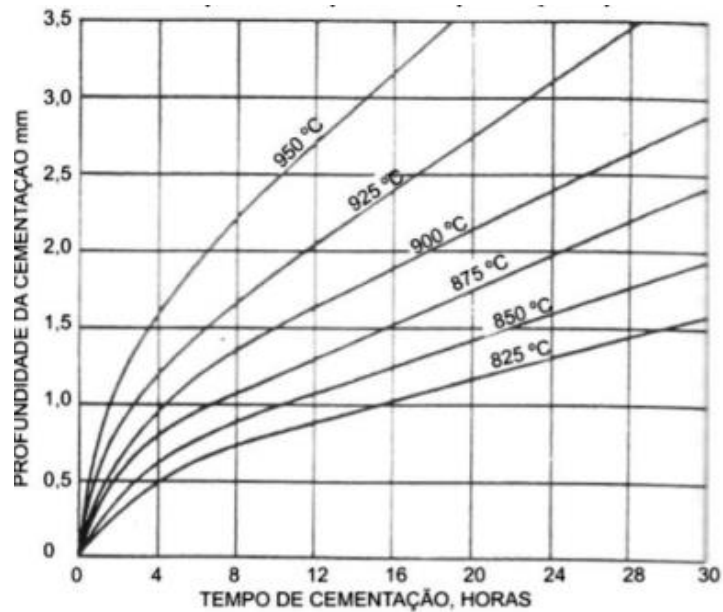
Segundo Costa e Silva (2006) a faixa de temperatura entre 500 °C e 1000 °C é a recomendada para que os processos difusionais, que atuam na efetivação do tratamento, sejam ativados, o que contribui para aumento da solubilidade do carbono na célula.

Os tratamentos termoquímicos mais utilizados são: cementação, nitretação, cianetação, carbonitretação e boretação. No trabalho presente iremos destacar o processo de cementação com mais detalhes (COSTA e SILVA, 2006).

2.5 Cementação

Sendo considerada um processo clássico, a cementação é um dos tratamentos mais empregados. Sua aplicação é recomendada nas chamadas ligas de baixo carbono (concentração de carbono inferior a 0,25%) o que permite um maior gradiente de difusão, ou seja, possibilita a movimentação do carbono na superfície do aço, sendo exposta a uma temperatura, chamada de atmosfera carbonetante, entre 815 °C e 950 °C (CHIAVERINI, 2003). Conforme demonstrado na Figura 4. Podemos observar pela figura também que quanto maior o tempo de cementação, maior a profundidade da camada cementada.

Figura 4: Influência da temperatura e tempo na penetração superficial



Fonte: CHIAVERINI (2003).

Após o processo de cementação, ocorre um aumento no teor de carbono em cerca de 0,8% a 1,0% na região da superfície uma vez que o núcleo permanece dúctil. É importante ressaltar que quanto menor a quantidade de carbono no aço, maior será a velocidade de difusão (SOUSA, 2016).

O processo de cementação do aço SAE 1020 geralmente é realizado sob uma temperatura de 900 °C por um período de 4 horas enquanto que o endurecimento da caixa cementada é realizado a 780 °C – 820 °C por uma têmpera em água seguido de um tratamento de revenido a 150 °C – 200 °C com o objetivo de melhorar a tenacidade da caixa sem alterar a dureza (CHIAVERINI, 1988).

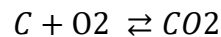
2.6 Tipos de cementação

A cementação pode ser de três tipos: sólida, líquida ou gasosa.

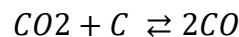
A cementação sólida, também conhecida como cementação em caixa, consiste na alocação da peça em caixas metálicas de material resistente ao calor (geralmente aço-liga) em um meio carbonizante contendo carvão (vegetal, madeira) junto a um ativador (CHIAVERINI,1988).

A reação que ocorre na cementação em caixa é:

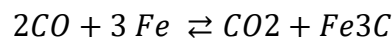
- Em razão da temperatura elevada, o carbono combina com o oxigênio do ar que se encontra no carvão da madeira:



- O dióxido de carbono reage com o carbono do carvão do meio carbonizante:



- Então, o CO reage com o ferro do aço, introduzindo carbono e formando CO_2



- Na sequência o CO_2 reage com o carbono do carvão incandescente o que irá gerar novamente CO. O ciclo se repete enquanto houver carbono para a realização do processo, os ativadores atuam no aumento da velocidade de fornecimento de CO.

A cementação sólida possui várias desvantagens pois, não possui o controle preciso do carbono superficial e não fornece um grau de flexibilização no controle das condições de cementação.

Segundo Baumgarten e Costa (2003), o carbonato de sódio ($NaCO_3$), também conhecido como barrilha, pode ser utilizado como ativador no tratamento de cementação sólida. Dentre os benefícios do uso do carbonato de sódio como ativador destaca-se:

- a) Redução da porosidade: a reação do carbonato de sódio com dióxido de carbono presente no ar acaba formando o carbonato de cálcio responsável por preencher os vazios nas partículas proporcionando um aumento da vida útil do material cementado;

- b) distribuição homogênea: atua no aumento da viscosidade da mistura evitando a segregação o que contribui para a formação de um camada uniforme e resistente;
- c) melhora no processo de solidificação: a reação do carbonato de sódio com componentes do material, como silicatos ou óxidos metálicos, acaba por formar materiais cimentantes adicionais o que contribui para o aumento da resistência.

Ao final do processo a profundidade de cementação pode alcançar um valor de até 2 mm ou mais. As vantagens apresentadas pela cementação sólida são: maior variedade de fornos, processo econômico e eficiente ou que torna ideal para pequenos lotes, menor tendência de empenamento devido ao resfriamento lento e apoio na mistura carbonizante sólida.

A cementação líquida é realizada com o aço em uma temperatura acima da temperatura de austenização em um banho de sal fundido promovendo o enriquecimento superficial do carbono. Existem dois tipos de banhos que diferem de acordo com a profundidade da camada desejada através da temperatura (alta temperatura e baixa temperatura);

Por fim, a cementação gasosa se difere das outras pelo fato de a substância carbonácea ser uma atmosfera gasosa, além da mistura carbonizante ficar bem definida e estável permitindo um melhor controle do teor de carbono e da espessura da camada cementada. A cementação a gás é mais rápida do que a cementação em caixa (CHIAVERINI,1988).

2.7 Engrenagens

De grande aplicação desde os primórdios da civilização, estudos evidenciam o uso de engrenagens desde os tempos pré-bíblicos, passando pela existência de arranjos de engrenagens em desenhos de Leonardo da Vinci, até o desenvolvimento do formato que conhecemos atualmente desenvolvido durante a Revolução Industrial com as técnicas de manufatura, a forma do disco de metal com a presença de dentes moldados (NORTON, 2004).

Engrenagens são elementos de máquinas empregados na transmissão de movimentos rotativos e torque, em diversas aplicações, a AGMA (American Gear Association) é o órgão referência em estudos, manufatura e regulamentação de

engrenagens. Segundo Mazzo (2003), engrenagens oferecem a forma mais prática e confiável de transmissão de movimento angular uniforme.

O funcionamento de um mecanismo com engrenagens que envolve o contato entre duas peças: o pinhão e a coroa. Essas engrenagens devem obedecer à lei fundamental do engrenamento, que afirma que a razão de velocidade angular entre elas deve permanecer constante durante o engrenamento. Um par de engrenagens é um dispositivo que permite a troca de torque por velocidade e vice-versa (NORTON, 2013).

2.8 Tipos de engrenagens

Em razão da existência de diversos tipos e tamanhos de máquinas assim como suas funções, as engrenagens também apresentam uma grande variedade de modelos sendo cada uma ideal para um tipo de aplicação. Entre os principais tipos de engrenagens podemos citar:

- ✓ Engrenagem cilíndrica de dentes retos: Este é provavelmente o tipo mais comum de engrenagem, e é projetada para operações com eixos paralelos em que seus dentes se encontram paralelos ao eixo das coordenadas (NORTON, 2013).
- ✓ Engrenagem cilíndrica de dentes helicoidais: Semelhante à engrenagem de dentes retos, mas os dentes são cortados em um ângulo helicoidal em relação ao eixo. Isso permite uma operação mais suave e silenciosa, mas também cria forças axiais que precisam ser suportadas.
- ✓ Engrenagem cônica de dentes retos: Estas são usadas onde os eixos de duas engrenagens se cruzam em um ângulo. Os dentes são cortados ao longo do cone e são paralelos ao eixo.
- ✓ Engrenagem cônica de dentes helicoidais: Similar à engrenagem cônica de dentes retos, mas os dentes são cortados em um padrão helicoidal, permitindo uma operação mais suave.
- ✓ Engrenagem cônica de dentes em espiral: Essas engrenagens possuem dentes cortados em uma espiral contínua ao redor do eixo, proporcionando um funcionamento extremamente suave e silencioso.
- ✓ Cremalheira: Uma cremalheira é uma barra ou trilho com dentes que se engrenam com uma engrenagem cilíndrica de dentes retos ou helicoidais, permitindo o movimento linear.

- ✓ Engrenagem planetária: Em um conjunto de engrenagens planetárias, uma ou mais 'engrenagens planetárias' giram em torno de uma 'engrenagem central' ou 'sol'. Este sistema é usado para obter diferentes relações de transmissão no mesmo espaço.
- ✓ Engrenagem sem fim: Este é um tipo especial de engrenagem usada onde uma grande redução de velocidade é necessária. A 'engrenagem sem fim' é uma engrenagem helicoidal, enquanto a engrenagem acionada é uma engrenagem normal de dentes retos ou helicoidais.

A escolha do tipo de engrenagem a ser usada depende das necessidades específicas da aplicação, incluindo as demandas de torque e velocidade, o espaço disponível para o mecanismo e outros fatores.

Figura 5: Engrenagem cilíndrica de dentes retos



Fonte: RW Olivo do Brasil (2018).

As vantagens do uso da engrenagem cilíndrica de dentes retos vão desde a capacidade de manter a pressão constante nos dentes, o que promove uma alta durabilidade, um elevado grau de precisão, boa eficiência na transmissão de energia, até uma manutenção facilitada. Contudo, sua aplicação está limitada a velocidades menores do que 50 m/s devido ao excesso de vibração e, principalmente, ruído (MAZZO, 2013).

Dentre as inúmeras aplicações de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos podemos destacar: trabalho de difusão em maquinário industrial, uso em aparelhamentos como caixote de difusão de tratores, automóveis e caminhões e empregada também em diversos modelos de redutores de velocidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O desenvolvimento experimental e as respectivas concepções foram realizadas no Campus de Guarapuava da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. O processo de cementação foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos, utilizando a microscopia óptica. Já o ensaio de microdureza Vickers foi realizado no Laboratório de Metrologia.

3.2 Obtenção de materiais

Para a realização do teste de perfil de dureza a engrenagem cilíndrica de dentes retos de aço SAE 1020 foi obtida pela empresa Usimais LTDA, situada na cidade de Iperó-SP.

3.3 Metodologia

Inicialmente foi utilizada uma cortadora metalográfica (CM40/60 da marca Teclago), conforme é possível observar na Fotografia 1, para realizar o corte das amostras em duas partes.

Fotografia 1: Cortadora metalográfica CM40/60



Fonte: Autoria própria (2023).

Após a divisão, foi feita a medida da microdureza das peças através do microdurômetro de bancada (marca Digimess). Em seguida, uma das partes foi inserida em um cadinho de cerâmica com tampa (200 ml) imersa em uma combinação

de carvão vegetal c 25 % de barrilha leve (marca Bel – composição 98% Carbonato de Sódio) utilizada como ativador no processo de cementação.

Na sequência, o cadinho foi levado ao forno mufla, segundo Fotografia 2, na temperatura de 900 °C, por um período de 5 horas.

Fotografia 2: Forno Mufla



Fonte: Autoria própria (2023).

Imediatamente após o período no forno, a peça cementada passou pelo processo de têmpera em água gelada com o objetivo de proporcionar um resfriamento uniforme, evitando assim, a possibilidade de concentração de bolhas na superfície da peça (possíveis formações de pontos de menor dureza).

Após a têmpera, foram realizadas novas medições de dureza da amostra na escala HV (Hardness Vickers) através do equipamento microdurômetro de Bancada marca Digimess, conforme Fotografia 3, com o objetivo de comparar os valores de dureza, antes e depois do processo de cementação.

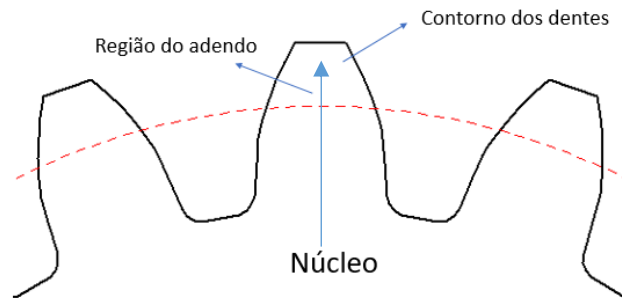
Fotografia 3: Microdurômetro de Bancada para dureza Rockwell Normal Digimess



Fonte: Autoria própria (2023).

As medidas foram realizadas em pontos distintos da amostra antes, e após, o processo de cementação, conforme representados na Figura 6 seguindo em direção do núcleo, passando pela região do adendo até camada cementada na região do contorno dos dentes.

Figura 6: Representação dos pontos de medição na engrenagem



Fonte: Autoria própria (2023).

Na sequência foi a peça foi embutida e lixada manualmente com as seguintes lixas de granulometria: 220, 320, 400, 600 e 1200 (nessa ordem respectivamente) segundo Fotografia 4.

Fotografia 4: Lixadeira Metalográfica manual de 4 pistas LM04



Fonte: Autoria própria (2023).

O polimento foi realizado utilizando a Politriz Lixadeira Metalográfica – PL02E, junto com uso de uma flanela (pano de polimento) com pasta de alumina, iniciado em 1 microns até a faixa de 0,5 microns, conforme Fotografia 5.

Fotografia 5: Lixadeira Politriz Metalográfica PL02E



Fonte: Autoria própria (2023).

Por fim, realizou-se um ataque químico utilizando o reagente Nital a 3% (97 ml de álcool etílico e 3 ml de ácido nítrico concentrado) por um período de tempo de 1 segundo seguido de limpeza da peça com água e álcool etílico.

A análise da micrografia foi efetuada por meio do microscópio óptico da marca Olympus BX51, conforme Fotografia 6. Nesta etapa foi possível visualizar o efeito do processo de cementação com a visualização da camada cementada.

Fotografia 6: Microscópio Olympus BX51



Fonte: Autoria própria (2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise por macrografia

Por meio da macrografia, vista na Fotografia 7, é possível notar a formação de uma camada contínua, logo abaixo da superfície, realizando um contorno nos dentes da engrenagem. Essa formação ocorre devido a difusão do carbono impulsionada pelo uso da barrilha leve (98% carbonato de sódio) como ativador que contribui na formação de uma região homogênea e, também, a realização da têmpera.

Uma condição muito importante a ser observada é a uniformidade da profundidade de cementação na superfície, pois uma camada muito espessa pode ocasionar uma falha prematura enquanto que uma camada mais fina pode tornar a engrenagem frágil.

Fotografia 7: Macrografia da amostra cementada

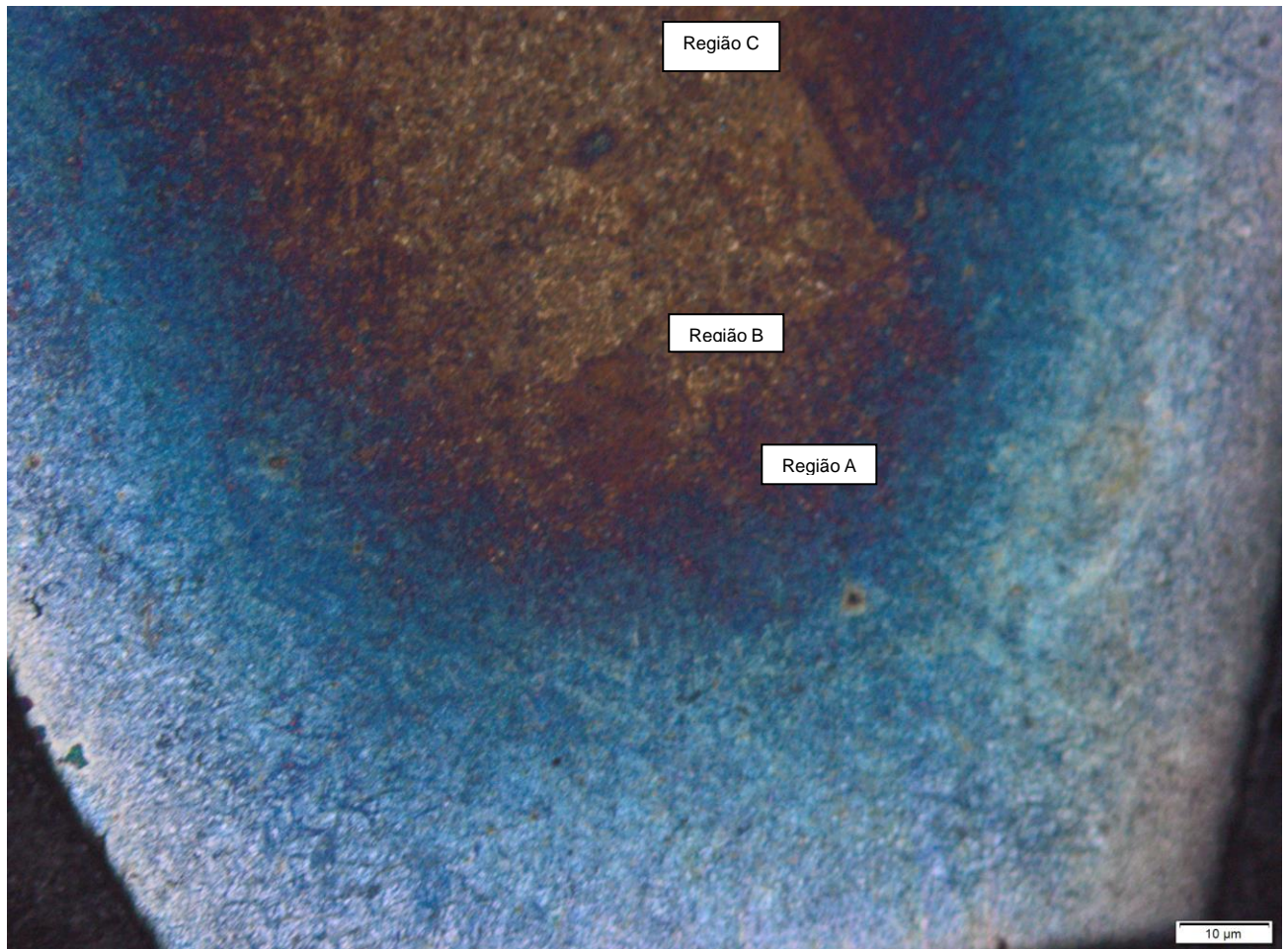


Fonte: Autoria própria (2023).

4.2 Análise por micrografia

A Fotografia 8 mostra a micrografia da amostra após todo processo de cementação, têmpera, lixamento e polimento. Nota-se a formação de regiões distintas após o processo de cementação, é possível observar: camada cementada próxima a superfície (região A); a zona de transição (região B) e ponto próximo ao núcleo do dente da amostra (região C). Destaca-se a formação de uma camada contínua e homogênea na região que contorna os dentes.

Fotografia 8: Micrografia da região cementada em escala de 10 μ m, ampliação 5X



Fonte: Autoria própria (2023).

Os resultados obtidos a partir análise metalográfica mostraram a formação de três regiões: a primeira, próxima ao topo, sendo a região contínua e homogênea que apresenta maior concentração de martensita, a zona de transição com variação no teor de martensita sendo composta então por martensita fina e a região e direção ao núcleo que apresenta maior concentração de perlita e ferrita. É importante que essa zona de transição seja gradual para não afetar a durabilidade da engrenagem pois uma variação muito brusca na concentração de martensita pode contribuir para uma falha precoce.

A Fotografia 9 trazem a micrografia obtida através da ampliação de 50X e 100X, respectivamente, e é possível observar a formação de uma camada caracteristicamente martensítica (coloração mais clara) na região A enquanto que nas regiões B e C, nota-se uma menor concentração. Segundo levanta Chiaverini (2002), a possibilidade de existência de uma quantidade de austenita retida na região cementada, porém é irrelevante no que se refere a uma alteração na dureza, essa

presença de austenita é uma retenção na microestrutura final em consequência do processo de têmpera direta feita em água gelada.

É possível observar que a essa camada segue em direção ao núcleo, porém diminuindo a concentração.

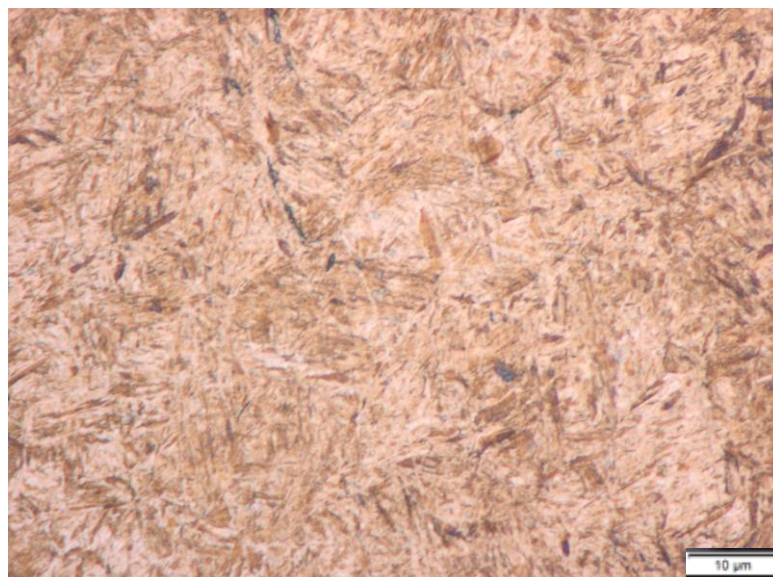
Fotografia 9: Micrografia zona transição em escala de 10 μ m, ampliação 50X



Fonte: Autorial própria (2023).

Em relação ao núcleo (região C) é possível observar pela Fotografia 10, com ampliação de 100 X, a formação de uma região com características diferentes das demais regiões. Essa diferença, em tese, é devido a uma menor concentração de carbono no núcleo em que é possível observar uma matriz tipicamente de ferrita e perlita, o que satisfaz o objetivo buscado para o processo de cementação da engrenagem, os dentes com maior dureza em relação ao núcleo.

. Fotografia 10: Micrografia do núcleo em escala de 10 μ m, ampliação 100X



Fonte: Autorial própria (2023).

4.3 Perfil de microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados em duas etapas: antes e depois da cementação. A escala de dureza utilizada foi a dureza Vickers (HV) em que dez pontos foram medidos no sentido do núcleo para o dente da amostra. Os valores obtidos antes do tratamento termoquímico podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Valores de microdureza antes do processo de cementação.

Distância da superfície (mm)	Dureza Vickers (HV)
0,2	630,3
0,4	710,4
0,6	610,2
0,8	645,3
1,0	685,7
1,2	684,3
1,4	678,9
1,6	690,6
1,8	680,7
2,0	650,5

Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores de microdureza da amostra após o processo de cementação encontram-se na Tabela 4.

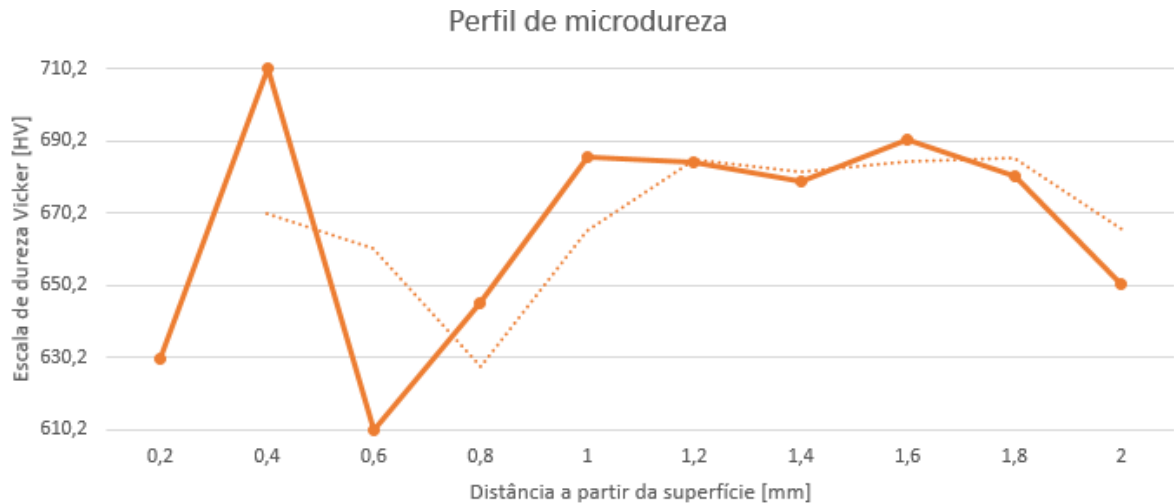
Tabela 4: Valores de microdureza depois do processo de cementação

Distância da superfície (mm)	Dureza Vickers (HV)
0,2	876,3
0,4	915,7
0,6	947
0,8	905
1,0	857,6
1,2	780,2
1,4	756,8
1,6	741,7
1,8	727,1
2,0	699,1

Fonte: Autoria própria (2023).

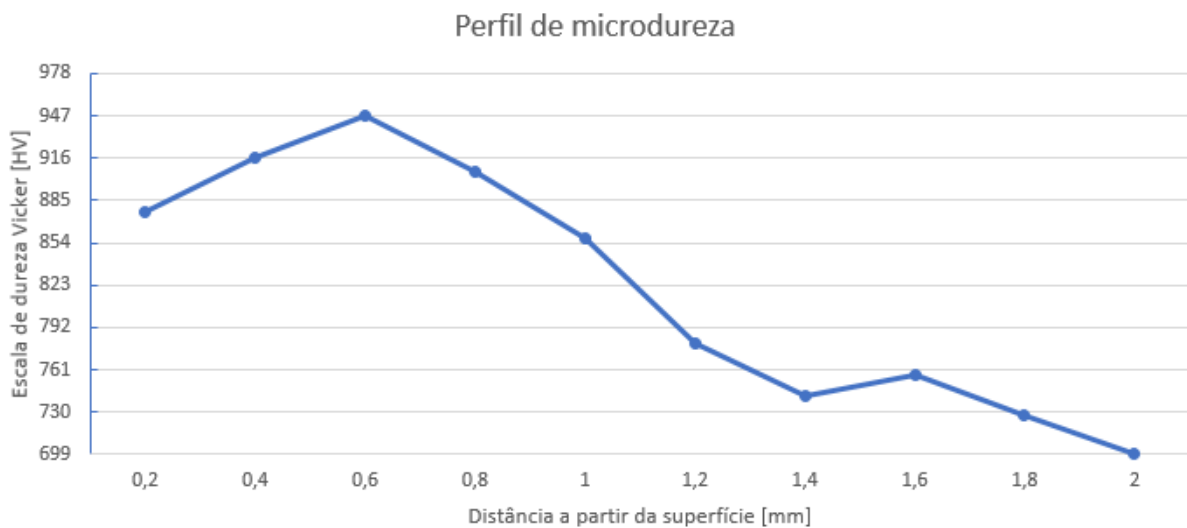
As Figuras 7 e 8 mostram os gráficos dos perfis de microdureza Vickers nos pontos medidos na direção da superfície para o núcleo, antes e depois da amostra ser cementada. Para as medições antes do processo de cementação, temos também o valor médio de dureza da amostra.

Figura 7: Perfil de microdureza antes da cementação



Fonte: Autoria própria (2023).

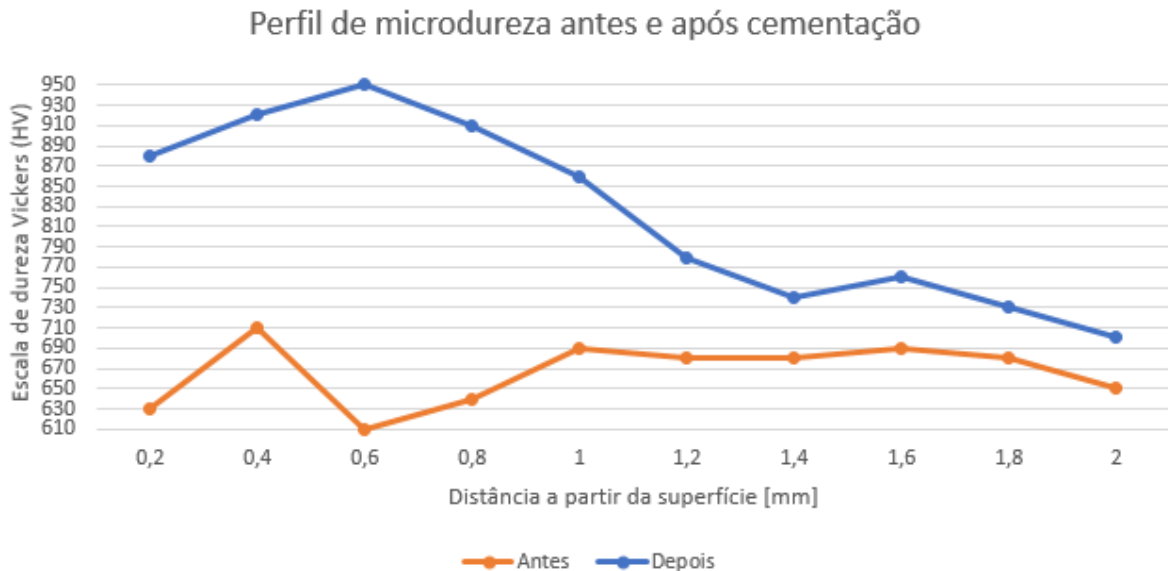
Figura 8: Perfil de microdureza após cementação



Fonte: Autoria própria (2023).

A Figura 9 apresenta um gráfico de comparação entre os perfis de microdureza antes e após a cementação em que temos a diferença no nível de dureza (na escala de dureza Vickers) e, também, sua gradativa diminuição à medida que se afasta da superfície.

Figura 9: Gráfico comparativo das microdurezas antes e após a cementação



Fonte: Autoria própria (2023).

A diferença nos valores de microdureza da amostra antes do processo de cementação justifica-se, segundo BALDAM E VIEIRA (2013), por fatores como: velocidade de resfriamento variável (devido a não uniformidade na taxa de resfriamento ocorre a formação de microestruturas irregulares); formação de gradientes de temperatura (no processo de solidificação, as regiões não se solidificam de maneira uniforme o que contribui para formação de microestruturas irregulares; presença de impurezas e efeitos de ligas (variações na composição ao longo da peça podem contribuir para diferenças dos níveis de dureza).

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir:

- O processo de cementação da amostra de engrenagem cilíndrica de dentes retos SAE 1020 ocorreu. Os resultados dos perfis de microdureza realizados confirmaram a presença de uma camada cementada que se estende desde a superfície até o núcleo do dente da engrenagem. O maior valor para o perfil de microdureza encontrado foi na região A com valor de microdureza na escala Vickers de 947 HV;
- Foi observada macroscopicamente a formação de uma linha contínua do núcleo até a superfície cementada, resultado desejado, evitando-se uma linha de demarcação, podendo assim fragilizar a peça;
- Foi possível observar a formação de uma camada cementada, contornando os dentes, antes da micrografia, o que confirmou a penetração do carbono na superfície dos dentes da engrenagem;
- Em relação a microestrutura formada, foram observadas a formação de três regiões a partir da extremidade para o núcleo dos dentes: a superfície da peça austenitizada e depois temperada, resultando em placas de martensita agulhadas na região cementada, formação de constituinte bainítico e/ou martensítico na região de transição e outra na região do núcleo dos dentes com perlita e ferrita, estruturas características do aço SAE 1020;
- A estrutura martensítica formada já era esperada pois é uma característica resultante de um super resfriamento ocorrido logo após a têmpera realizada, onde a alta taxa de resfriamento impede a difusão do carbono, ocorrendo assim a formação dessa estrutura;

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento de novos trabalhos relacionados ao tema proporciona um conhecimento cada vez mais aprofundado e permite a exploração de novos processos. Algumas possibilidades para estudos futuros seriam:

- Comparar o perfil de dureza entre amostras com tempos diferentes cementação sólida;
- analisar o resultado da cementação após têmpera em diferentes meios de resfriamento;

comparar o perfil de dureza entre amostras utilizando diferentes ativadores (carbonato de sódio, fosfato de cálcio, sulfato de cálcio, etc).

5 REFERÊNCIAS

- ASKELAND, DONALD R.; WRIGHT, WENDELIN J. **Ciência e engenharia dos materiais** – tradução da 4ª edição norte-americana. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522128129/>>. Acesso em: 02/05/2022.
- ASKELAND, D. R; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3ª Edição São Paulo, 2016.
- CALLISTER, WILLIAM D J. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636991/>>. Acesso em: 02/05/2022.
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6ª EDIÇÃO SÃO PAULO, SP: ABM, 1988.
- CHIAVERINI, VICENTE. **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: ABM, 2002.
- COSTA E SILVA, A; MEI, P. ROBERTO. **AÇOS E LIGAS ESPECIAIS**. 2.ED. SÃO PAULO, EDGARD BLÜCHER, 2006.
- DAVIS, J. R. (ED.). **Gear materials, properties, and manufacture**. ASM INTERNATIONAL, 2005.
- BAUMGARTEN, J. F.; COSTA, C. E. **Cementação empregando granulados elaborados a partir de carvão vegetal reciclado e ativador de carbonato de cálcio (caco3)**. Universidade do estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.
- GARCIA, N. G. **Estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320**. Instituto Federal de Santa Catarina. Jaraguá do sul, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/234/natalia_Garcia_tccfab_2017.pdf?sequence=1&isallowed=y>. acesso em: 12/05/ 2022.
- KODA, F. **Estudo da fadiga de contato em engrenagens cilíndricas de dentes retos**. Universidade Tecnológica federal do Paraná – UTFPR, 2009.
- LEITÃO, C. J; MEI, P. R; LIBARDI, R. **Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens produzidas com aços abnt 4140 e 8620**. Tecnologia em metalurgia e materiais, 2012.
- MAZZO, NORBERTO. **Engrenagens cilíndricas da concepção á fabricação**. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521207276/>>. Acesso em: 02/05/2022.

NORTON, ROBERT L. **Projeto de máquinas. 2013.** disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582600238/>>. Acesso em: 12/05/2022.

SOUSA, SÉRGIO A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos. 5ª edição.** São Paulo, Blucher, 1982.

BALDAM, ROQUEMAR, VIEIRA, ESTEFANO **Fundição: Processos e tecnologia correlatos;** São Paulo: Érica, 2013, 384 P.