

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUSTAVO KOHL PATAN

**TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO UTILIZANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ E CARVÃO VEGETAL EM AÇO SAE 1020 SEGUIDO DE
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO**

ALEGRETE

2018

GUSTAVO KOHL PATAN

**TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO UTILIZANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ E CARVÃO VEGETAL EM AÇO SAE 1020 SEGUIDO DE
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.^a Dra. Ana Claudia Costa
Oliveira

ALEGRETE

2018

GUSTAVO KOHL PATAN

**TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO UTILIZANDO CINZA DA
CASCA DE ARROZ E CARVÃO VEGETAL EM AÇO SAE 1020 SEGUIDO DE
TRATAMENTO TÉRMICO DE TÊMPERA E REVENIDO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 07 de dezembro de 2018.

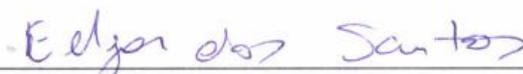
Banca examinadora:



Prof.^a. Dra. Ana Claudia Costa Oliveira
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhöft
UNIPAMPA



Prof. Dr. Edgar Gonzaga Souza dos Santos
UNIPAMPA

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó, Maria de Lourdes, que sempre me incentivou a estudar e a resistir às dificuldades. E que, apesar de não estar presente fisicamente, orienta minhas decisões e ilumina meus passos, por todos os ensinamentos transmitidos em vida.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos em mim depositadas; e por permitir, que com saúde e força, seguisse em busca dos meus sonhos e objetivos.

Aos meus pais, Harol e Lisandra, pelo apoio durante esse árduo período de graduação, e por tornar esse momento possível.

Aos meus irmãos, Bernardo, Rafael e Natieli, pela compreensão pelas vezes que estive distante e pelo companheirismo, por oferecer auxílio quando necessário.

À minha namorada, Kassiana, por todo amor, carinho, compreensão e incentivo. Obrigado por sempre apoiar minhas decisões, me dando coragem a sempre seguir em frente.

Aos colegas e amigos que conheci na graduação, em especial ao Luís Guilherme, vulgo Bell, Mateus Trelles e Henrique Roggia, que me auxiliaram nos momentos de dificuldades. Aos colegas de residência, Leonardo, Gil e André, pelos momentos compartilhados no dia a dia.

A minha orientadora Prof^a. Dra. Ana Cláudia Costa de Oliveira, pelos ensinamentos e dedicação durante o desenvolvimento desse trabalho, sempre disposta a ensinar novas técnicas e teorias, tornando possível a realização dessa pesquisa.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Durlo Tier, obrigado pelos ensinamentos e por sempre estar à disposição para o diálogo pertinente ao trabalho.

Aos demais professores da graduação, minha eterna gratidão por todos os ensinamentos proporcionados.

Aos técnicos dos laboratórios da Unipampa, pelo auxílio e paciência para explicar o uso dos equipamentos utilizados.

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes”.

Isaac Newton

RESUMO

Visando melhorias nas propriedades mecânicas em componentes mecânicos, mais precisamente resistência ao desgaste superficial e dureza dos materiais, constantemente são desenvolvidos estudos sobre os processos de tratamentos térmicos e termoquímicos de metais. Estes, influenciam diretamente nas propriedades mecânicas das peças para que atendam às necessidades de suas funções. O objetivo geral deste trabalho é comparar os efeitos do tratamento termoquímico de cementação com duas fontes de carbono diferentes, sendo elas carvão vegetal e cinza da casca de arroz; após a cementação são aplicados os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, para assim obter elevada dureza nas amostras de aço SAE 1020. As amostras foram analisadas por espectroscopia de emissão óptica, microscopia óptica, micro durômetro, e ensaio de desgaste superficial. Os resultados mostram que os procedimentos de tratamentos térmicos e termoquímicos citados foram realizados de maneira correta, obtendo maiores valores de dureza superficial nas amostras tratadas quando comparadas ao aço 1020 sem tratamentos térmicos; através das micrografias ópticas fica evidenciada a camada superficial enriquecida com carbono resultante da cementação; nas imagens metalográficas também é observada a má formação de martensita na microestrutura das amostras com o tratamento térmico de têmpera; ocorreu um aumento significativo da resistência ao desgaste superficial das amostras após os procedimentos realizados. De maneira geral, os resultados de micro dureza e resistência ao desgaste foram superiores nas amostras de aço 1020 que receberam cementação com carvão vegetal.

Palavras-Chave: Tratamento térmico, tratamento termoquímico, cementação, têmpera, cinza da casca de arroz, carvão vegetal, aço SAE 1020.

ABSTRACT

Aiming at improving the mechanical properties of metallic mechanical components, more precisely the resistance to surface wear and the hardness of the materials, studies on the thermal and thermochemical treatment processes of metals are constantly being developed. These, directly influence the mechanical properties of parts to meet the needs of their applications in their function. The general objective of this work is to compare the effects of the thermochemical treatment of cementation with two different carbon sources, being charcoal and rice husk ash; after carburizing, the quenching and tempering treatments were applied to obtain high hardness in SAE 1020 steel samples. The samples were analyzed by optical emission spectroscopy, optical microscopy, micro-durometer, and surface wear test. The results show that the thermal and thermochemical treatment procedures were performed correctly, obtaining higher values of surface hardness in the treated samples when compared to 1020 steel without thermal treatments; through the optical micrographs the carbon-enriched surface layer resulting from the cementation is evidenced; in the metallographic images the martensite malformation is observed in the microstructure of the samples with the tempering heat treatment; there was a significant increase in the surface wear resistance of the samples after the procedures performed. In general, the results of micro hardness and wear resistance were higher in 1020 steel samples that received carburizing with charcoal.

Keywords: Heat treatment, thermochemical treatment, carburizing, quenching, rice hull ash, charcoal, SAE 1020 steel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama TTT esquemático de têmpera e revenido	24
Figura 2 - Curvas de dureza em função da temperatura de revenido para diferentes variações de carbono	26
Figura 3 - Fluxograma da pesquisa	29
Figura 4 - Material para confecção das amostras	30
Figura 5 - Espectrômetro B2-Advanced	31
Figura 6 - Forno Mufla FL 1300/7E	31
Figura 7 - Caixas confeccionadas para cementação.....	33
Figura 8 - Cinza da casca de arroz	33
Figura 9 - Preparação do carvão.....	34
Figura 10 - Cortadora metalográfica Isomet 1000	35
Figura 11 - Embutidora EFD30.....	36
Figura 12 – Lixadora e pano de polimento	36
Figura 13 - Microscópio óptico IM 713 e microcomputador.....	37
Figura 14 - Microdurômetro Buehler.....	38
Figura 15 - Indentação HV 0,5kg 500x.....	38
Figura 16 - Geometria do indentador Vickers.....	39
Figura 17 - Ilustração do perfil de microdureza	40
Figura 18 – Equipamento para ensaio de desgaste	41
Figura 19 - Esquema de funcionamento ensaio de desgaste.....	42
Figura 20 - Equipamento ensaio desgaste.....	42
Figura 21 - Balança Shimadzu AY220	44
Figura 22 - Microestrutura aço SAE 1020 (400x)	45
Figura 23 - Microestruturas da condição 1 (400x)	45
Figura 24 - Microestruturas da condição 2 (400x)	46
Figura 25 - Microestruturas da condição 3 (400x)	46
Figura 26 - Microestruturas da condição 4 (400x)	47
Figura 27 - Microestruturas da condição 5 (400x)	47
Figura 28 - Microestruturas da condição 6 (400x)	48
Figura 29 - Microestruturas da condição 7 (400x)	48
Figura 30 - Microestruturas da condição 8 (400x)	49
Figura 31 - Perfis de microdureza condições 1 e 2	51

Figura 32 - Perfis de microdureza condições 3 e 4	52
Figura 33 - Perfis de microdureza condições 5 e 6	54
Figura 34 - Perfis de microdureza condições 7 e 8	55
Figura 35 - Perfis de microdureza condições 1, 3, 5 e 7	56
Figura 36 - Perfis de microdureza condições 2, 4, 6 e 8	57
Figura 37 - Gráfico comparativo de perda de massa: cementação carvão	58
Figura 38 - Gráfico comparativo de perda de massa: cementação cinza.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de alguns aços de baixo carbono	27
Tabela 2 - Composição química aço SAE 1020	30
Tabela 3 - Parâmetros tratamentos termoquímicos de cementação	32
Tabela 4 - Detalhamento do ensaio de microdureza	40
Tabela 5 - Parâmetros para ensaio de desgaste abrasivo	43
Tabela 6 - Composição química aço SAE 1020 utilizado	44
Tabela 7 - Resultados Microdureza Condições 1 e 2	50
Tabela 8 - Resultado microdureza condições 3 e 4	51
Tabela 9 - Resultados microdureza condições 5 e 6	53
Tabela 10 - Resultados microdureza condições 7 e 8	54
Tabela 11 - Resultados Médios Ensaio de Desgaste	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

C – Carbono

CCA – Cinza da casca de Arroz

CFC – Estrutura Cubica de Face Centrada

CH₄ – Gás Metano

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

D – Coeficiente de difusão de um elemento químico na austenita

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

Fe₃C – Composição química da cementita

H₂ – Gás Hidrogênio

HV – *Vickers Hardness* (Dureza Vickers)

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz

mi – Massa inicial

mo – Massa final

MO – Microscópio óptico

Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

NBR – Norma Brasileira

O₂ – Gás Oxigênio

Pm – Perda de massa

Q – Energia de ativação para difusão

R – Constante Universal dos Gases

SAE – *Society of Automotive Engineers*

TCC – Estrutura Tetragonal de Corpo Centrado

TTT – Curvas de Tempo-Temperatura-Transformação

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo geral.....	16
1.2	Objetivos específicos	16
1.3	Justificativa	16
2	Revisão Bibliográfica	16
2.1	Tratamentos Termoquímicos em Aços	17
2.1.1	Difusão de Carbono	18
2.1.2	Tratamento Termoquímico de Cementação	19
2.1.3	Cementação Sólida	21
2.2	Tratamentos Térmicos em Aços	23
2.2.1	Tratamento Térmico de Têmpera	23
2.2.2	Revenimento.....	25
2.3	Aço SAE 1020	27
2.4	Cinza da Casca de Arroz (CCA)	28
3	Metodologia	29
3.1	Materiais	30
3.2	Tratamento Termoquímico de Cementação Sólida	31
3.2.1	Confecção de Caixa para Cementação	32
3.2.2	Preparação das Misturas de Cementação	33
3.3	Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido	34
3.4	Análise Metalográfica.....	35
3.4.1	Microscopia Óptica (MO)	37
3.5	Ensaio Mecânicos	37
3.5.1	Ensaio de Microdureza	38
3.5.2	Ensaio de Desgaste.....	41
4	RESULTADOS	44
4.1	Composição do aço SAE 1020	44
4.2	Microscopia Óptica	45
4.3	Ensaio de Microdureza	49

4.4	Ensaio de Desgaste.....	57
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	61
6	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos e as exigências cada vez maiores por qualidade e segurança dos componentes mecânicos em serviço, levam a busca incessante por métodos que atendam tais requisitos. Os tratamentos térmicos e termoquímicos de metais estão diretamente ligados à essa necessidade, pois com a aplicação dos procedimentos adequados resultam em melhores propriedades mecânicas para os materiais.

Dentre as diversas técnicas para se obter maior resistência ao desgaste superficial dos aços, o tratamento termoquímico de cementação é certamente um dos métodos mais antigos existentes. O processo consiste basicamente em aumentar o teor de carbono em uma fina camada na superfície da peça, ou seja, se o aço é de baixo teor de carbono, apenas a camada superficial é alterada com a adição desse elemento, mantendo as características iniciais no núcleo.

Em aços que passam por tratamento termoquímico de cementação são empregados tratamentos térmicos de têmpera e revenido, resultando assim, em alta dureza superficial e, conseqüentemente, maior resistência ao desgaste. Em peças como engrenagens, por exemplo, deseja-se um núcleo tenaz e uma superfície resistente ao desgaste e para atender a esses requisitos, aços de baixo teor de carbono são submetidos aos tratamentos de cementação, têmpera e revenimento.

O estudo de métodos e técnicas para aumentar a resistência ao desgaste em componentes mecânicos são cada vez mais abordados em pesquisas científicas. Arelado a esse aumento de resistência, busca-se também uma boa relação custo-benefício para os processos de tratamentos térmicos, estudando e aprimorando tecnologias, procedimentos e materiais para a sua realização.

O trabalho proposto aborda a resistência ao desgaste abrasivo e técnicas para evitá-lo, ou diminuir a sua incidência. Para isso, o tratamento termoquímico de cementação foi realizado utilizando duas fontes de carbono diferentes, carvão vegetal e cinza da casca de arroz, com variações de temperaturas e tempos de tratamento em aço SAE 1020; seguidos de tratamento térmico de têmpera e revenido. O tema de estudo é tratado com base em informações já existentes na literatura, bem como, testes laboratoriais.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é comparar os efeitos do tratamento termoquímico de cementação, utilizando carvão vegetal e cinza da casca de arroz, seguidos de tratamento térmico de têmpera e revenimento, nas propriedades mecânicas e tribológicas do aço SAE 1020.

1.2 Objetivos específicos

1. Analisar e comparar a microdureza entre as diferentes condições de tratamentos;
2. Avaliar e comparar a resistência ao desgaste das amostras;
3. Analisar a microestrutura após os tratamentos termoquímicos e térmicos;
4. Avaliar os melhores parâmetros para os tratamentos termoquímicos e térmicos realizados.

1.3 Justificativa

A pesquisa procura garantir a qualidade dos tratamentos térmicos e termoquímicos realizados, buscando determinar a viabilidade da utilização da cinza de casca de arroz como fonte de carbono para a cementação.

Ainda, a realização deste trabalho busca consolidar os conhecimentos teóricos em tratamentos térmicos e termoquímicos, através de observações experimentais, ensaios mecânicos e metalográficos, contribuindo para a formação profissional do pesquisador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados os conceitos básicos e a fundamentação a respeito dos assuntos que são tratados e utilizados na realização deste trabalho, como: aço SAE 1020, tratamentos térmicos (têmpera e revenimento), tratamentos termoquímicos (cementação) e algumas pesquisas na área de cementação em aços carbono. Este embasamento teórico teve como referências artigos, teses, livros e apostilas.

2.1 Tratamentos Termoquímicos em Aços

O tratamento é denominado termoquímico pois é um processo que tem como objetivo a adição de elementos químicos na superfície do aço e nas seções onde se deseja aumentar a dureza. O mecanismo responsável pela adição dos elementos químicos (carbono, nitrogênio, molibdênio e boro) é a difusão, que ocorre com o aquecimento do aço em temperaturas entre 300 e 1200°C (SILVA e MEI, 2006; CHIAVERINI 2008).

Segundo CHIAVERINI (2008), a profundidade da alteração da composição química do aço depende: da temperatura de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura de tratamento em contato com o meio (elemento químico que se deseja adicionar ao aço).

Segundo (SILVA e MEI, 2006; CHIAVERINI, 2008) os tratamentos termoquímicos mais utilizados para o endurecimento superficial são:

- Cementação
- Nitretação
- Cianetação
- Carbonitretação
- Boretção.

Os fatores que influenciam no controle do processo de tratamento termoquímico são (SILVA, 2006):

- a) Potencial do meio (sólido, líquido, gasoso ou plasma), em que a peça está imersa, de fornecer o elemento químico (carbono, nitrogênio, boro).
- b) Capacidade de a peça absorver este elemento químico. Isso está relacionado com a solubilidade e a difusão do elemento químico no aço.

O objetivo deste trabalho envolve apenas o tratamento termoquímico de cementação, por isso apenas este processo será discutido.

2.1.1 Difusão de Carbono

Segundo CALLISTER (2007), a difusão em estado sólido é um mecanismo de transporte de massa que ocorre no interior do material, mediante um movimento atômico que se processa em etapas.

Difusão sob condições de regime não-estacionário significa que o fluxo de difusão e o gradiente de concentração em um ponto específico no sólido variam com o tempo, resultando em acúmulo ou esgotamento do componente que está se difundindo (CALLISTER, 2007).

A difusão de carbono da superfície para o interior da peça causa um gradiente de concentração de carbono, que varia com a distância e com o tempo, sendo descrita pela Segunda Lei de Fick, através da Equação 1 (CALLISTER, 2007):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \left(\frac{\partial c}{\partial x} \right) \right) \quad (1)$$

Onde:

x – Distância da superfície da peça ao centro [m];

t – Tempo de tratamento [s];

D – Coeficiente de difusão de um elemento químico na austenita [m²/s];

C – Concentração de carbono a uma distância x [%];

Como o coeficiente de difusão é independente da composição, a Equação 1 pode ser simplificada para:

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

O coeficiente de difusão de um elemento químico na austenita pode ser calculado pela seguinte equação (SILVA e MEI, 2006; CALLISTER, 2007):

$$D = D_0 * e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (3)$$

Onde:

D_o – Uma constante [m^2/s];

Q – Energia de ativação para difusão [J/mol];

R – Constante universal dos gases ideais [$8,31 J/mol.K$];

T – Temperatura absoluta [K].

CALLISTER (2007) descreve a solução da Equação 2 para cementação em aços:

$$\frac{C_c - C_s}{C_o - C_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2Dt^{1/2}}\right) \quad (4)$$

Onde:

C_c – Concentração de carbono a uma distância x da superfície após um tempo t de tratamento de cementação [%];

C_s – Concentração de carbono na superfície mantida pelo potencial de carbono da atmosfera [%];

C_o – Concentração inicial de carbono na liga Fe-C [%];

D – Coeficiente de difusão do carbono na austenita [m^2/s];

erf – Função erro de Gauss.

2.1.2 Tratamento Termoquímico de Cementação

O tratamento termoquímico de cementação é utilizado principalmente em aços de baixo teor de carbono, tendo como objeto a adição desse elemento na superfície dos aços. A absorção do carbono para o interior do material ocorre através do fenômeno de difusão em temperaturas geralmente entre 850 e 950°C, criando um gradiente de concentração de carbono entre a superfície e o interior do componente. Este processo visa melhorar a temperabilidade na superfície do material, com a adição de carbono, mantendo as características originais no núcleo da peça (LAMPMAN, 1991).

BAUMGARTEN (2003) explica que, qualquer operação de saturação de uma superfície por difusão deve ser executada em um meio que possa liberar o elemento a ser difundido em um estado atômico (iônico). Para a cementação, o elemento em questão é o carbono. Deve haver o contato entre os átomos que serão difundidos e a

superfície que será tratada, o que formará ligações químicas com os átomos da matriz metálica (absorção). Então, haverá a difusão propriamente dita, que é a penetração do soluto na matriz metálica.

O objetivo principal da cementação é proporcionar um aumento de dureza e resistência ao desgaste superficial, aliada à boa tenacidade no núcleo da peça (SILVA e MEI, 2010). Apenas com a cementação o aço não apresenta alta dureza superficial, este aumento de resistência mecânica e dureza é obtido através de um tratamento térmico conhecido como têmpera, que é realizado posterior à cementação; desta maneira, a camada superficial apresentará uma maior dureza que o núcleo. Com estes procedimentos também são produzidas tensões residuais compressivas na superfície, o que normalmente eleva a vida em fadiga do componente (CHIAVERINI, 2008).

CHIAVERINI (2008) destaca que é necessário que o aço, em contato com o meio, seja aquecido a uma temperatura que a solução do carbono no ferro seja fácil. Para isso, a temperatura deve ser superior a zona crítica (850° a 950°C) ou seja, onde o ferro se encontrará na forma alotrópica gama.

FOREMAN (1991), afirma que além do tempo e da atmosfera em que a cementação é feita, existe outra variável que contribui diretamente para obtenção de bons resultados no processo, que é o potencial de carbono do meio cementante. Esse potencial é a quantidade máxima de teor de carbono que pode ser acrescentado a um determinado aço.

Sabendo que a cementação é influenciada pela fonte de suprimento de carbono (meio cementante), CHIAVERINI (2008) identificou alguns fatores que influenciam sobre a velocidade de enriquecimento de carbono na superfície dos aços. Os fatores são:

- Teor inicial de carbono no aço: quanto menor o teor de carbono no aço, maior a velocidade de carbonetação.
- Coeficiente de difusão do carbono no aço: é fundamental para a cementação, pois o enriquecimento superficial de carbono é um fenômeno de difusão; isto é, de movimento relativo de carbono no interior do aço.
- Temperatura: é o fator mais importante, pois com sua elevação acelera a difusão e, conseqüentemente, a velocidade de reação de cementação na superfície do aço.
- Concentração de carbono na austenita.

- Natureza do agente cementante ou gás de cementação: a reação de transferência ocorre na superfície do aço. Os agentes supridores de carbono mais comuns são CO e CH₄ e as reações que ocorrem na superfície do aço podem ser representadas por:



Onde (C) representa o carbono dissolvido no ferro na superfície do aço.

Segundo FOPPA (2009), o tratamento termoquímico de cementação pode ser efetuado de três maneiras, são eles:

- 1) Cementação sólida ou em caixa: onde a fonte de carbono é uma mistura de materiais sólidos;
- 2) Cementação líquida: a fonte de carbono é uma mistura de sais liquefeitos na temperatura de austenitização do aço;
- 3) Cementação gasosa: a fonte de carbono é gás ou líquido vaporizável na temperatura de austenitização do aço.

MOTA et al (2014) fez um tratamento termoquímico de cementação em um reator a plasma de aço AISI 304. Os tratamentos termoquímicos foram efetuados a uma temperatura de 350 °C de uma a cinco horas, em uma atmosfera fixa, composta por 7% de CH₄ (gás metano) e 93% de H₂ (gás hidrogênio). Os resultados mostraram melhora progressiva nas cinco horas de cementação, principalmente na avaliação de dureza superficial.

2.1.3 Cementação Sólida

Na cementação sólida, ou cementação em caixa, as peças são colocadas dentro de uma caixa feita de aço, e dentro desta caixa é colocada uma mistura, ou pó cementante rico em carbono, normalmente compostos de carvão vegetal e ativadores. Os ativadores mais comuns são os carbonatos alcalinos – ferrosos, como carbonato

de sódio, carbonato de potássio, carbonato de cálcio e carbonato de bário. (CHIAVERINI (2008)).

Esta caixa é colocada dentro do forno com temperatura entre 850 a 1050°C; a essa temperatura o oxigênio presente no ar se combina com o carbono da caixa de cementação, produzindo dióxido de carbono ($C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$). O dióxido de carbono se une com o carbono do meio cementante, gerando monóxido de carbono ($CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO$), entretanto, o mesmo irá se adaptar com o ferro do aço, gerando mais CO_2 ($3Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_3C + CO_2$). A essa temperatura, o carbono no meio cementante passa por difusão para a superfície da peça (SILVA e MEI, 2006).

SILVA e MEI (2006) e CHIAVERINI (2008), destacam as principais vantagens e desvantagens da cementação sólida, são elas:

Vantagens:

- Pode utilizar uma maior variedade de fornos, pois produz sua própria atmosfera cementante;
- É ideal para peças que precisam de resfriamento lento após a cementação;
- Diminui a tendência ao empenamento das peças devido ao fato de elas se apoiarem bem na mistura cementante sólida.

Desvantagens:

- Não permite controle do potencial de carbono na superfície da peça;
- Não é recomendada para têmpera direta após a cementação;
- É mais lenta que os outros processos de cementação, pois ocorre o aquecimento e resfriamento das peças junto com a caixa que as contém.

A profundidade da camada cementada varia de 0,2 a 6,9 mm dependendo diretamente do tempo e da temperatura utilizadas no processo. Essa camada é medida por meio da dureza do material, traçando um perfil de microdureza partindo da superfície em direção ao núcleo (SILVA e MEI, 2006).

2.2 Tratamentos Térmicos em Aços

CHIAVERINI (2008) define tratamento térmico como “conjunto de operações a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades mecânicas ou obter características determinadas.”

As propriedades mecânicas dos aços são dependentes fundamentalmente de três fatores: composição química, processamento e estrutura. Dessa forma, o tratamento térmico tem como objetivo modificar apenas a estrutura dos aços, para que sejam obtidas as propriedades desejadas, sem ocorrer alteração da composição química do material. O aprimoramento de uma ou mais propriedades pode ser conseguida, mas com o prejuízo de outras (CHIAVERINI, 2008).

2.2.1 Tratamento Térmico de Têmpera

Somente a adição de carbono ao aço não resulta em aumento da dureza, portanto, é necessário um tratamento de têmpera após a cementação para que ocorra uma otimização da resistência a tração e dureza (CHIAVERINI, 2008).

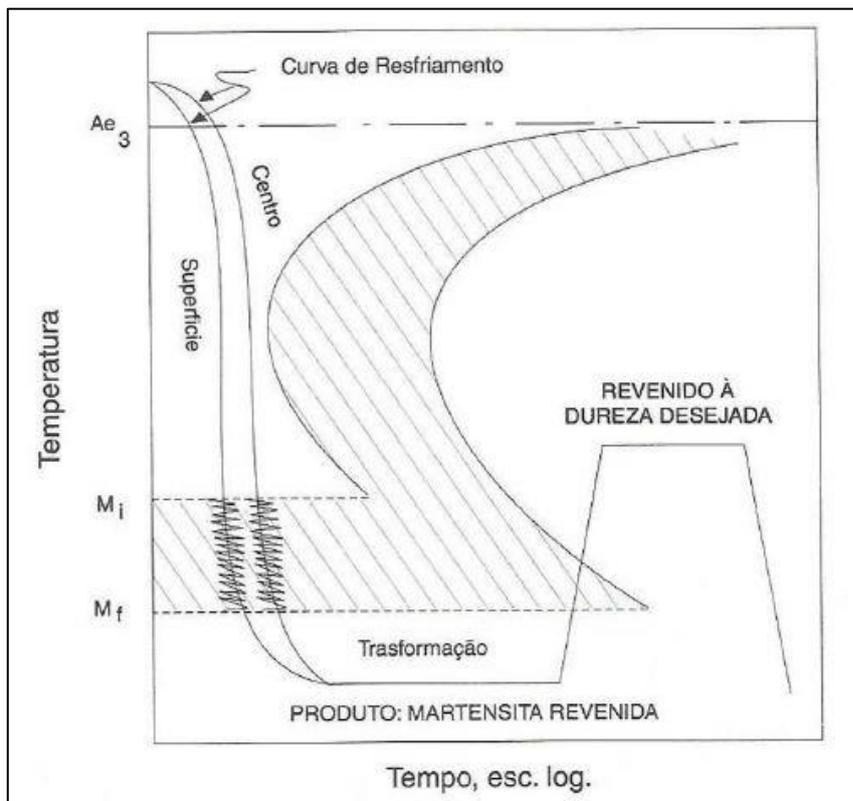
A têmpera é o processo de aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização, seguido de um resfriamento rápido. A estrutura obtida após o resfriamento rápido é acicular (em forma de agulhas) conhecida como martensita (HOLTZ, 1992). Os objetivos dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, são o aumento da dureza do aço e da sua resistência ao desgaste. Em se tratando de aços cementados, procura-se uma camada externa temperada dura e resistente à abrasão enquanto o núcleo seja tenaz, resistente ao impacto, com uma baixa dureza (CHIAVERINI, 2008).

Os meios de resfriamento utilizados dependem da temperabilidade dos aços, isto é, do teor de carbono e da presença de elementos de liga, além da forma e dimensões das peças. Os meios de resfriamento para a têmpera mais usados são: óleo, água e salmoura (ASM, 1997; EBERT, 1978).

A função do banho de resfriamento da têmpera é controlar a taxa de transferência de calor da superfície da peça que está sendo tratada, para garantir que o resultado desejado será alcançado (CHIAVERINI, 2008).

Na Figura 1 é demonstrado o diagrama tempo-temperatura-transformação (TTT) para o processo de têmpera seguida de um segundo tratamento (revenido), onde é possível visualizar que o resfriamento deverá ser rápido o suficiente para passar à esquerda da curva de transformação que tem formato em “C”. Caso a curva de resfriamento ultrapasse a curva em formato de “C”, daria início a formação de perlita ou bainita, diferente da estrutura martensítica que é o objetivo da têmpera.

Figura 1 - Diagrama TTT esquemático de têmpera e revenido



Fonte: CHIAVERINI, 2008.

A martensita é uma estrutura monofásica, resultante de uma transformação sem difusão da austenita. Devido à alta velocidade de resfriamento que impede a difusão do carbono, ocorre apenas um pequeno deslocamento de cada átomo em relação aos seus vizinhos, resultando na transformação da estrutura CFC da austenita em estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) da martensita (CALLISTER, 2002).

O limite inferior de temperatura no tratamento de têmpera está condicionado à austenitização do aço e o limite superior está condicionado ao crescimento do grão. O carbono se dissolve no ferro gama durante o aquecimento e seus átomos se distribuem nos interstícios presentes na estrutura cristalina. Quando ocorre o

resfriamento brusco, não há tempo para que os átomos de carbono se difundam. Dessa maneira, os espaços entre os átomos de ferro na estrutura CFC do ferro alfa são incapazes de acomodar átomos de carbono sem que ocorra considerável deformação do reticulado. A dureza da martensita é atribuída a esse efeito de supersaturação e à densidade de defeitos cristalinos, especialmente discordâncias e contornos de ânulos altos e baixos (CHIAVERINI, 2008).

A têmpera pode ser direta, ou seja, logo após a cementação do material, ou pode ser por reaquecimento, onde o aço é resfriado após a cementação e austenitizado novamente para o tratamento térmico de têmpera.

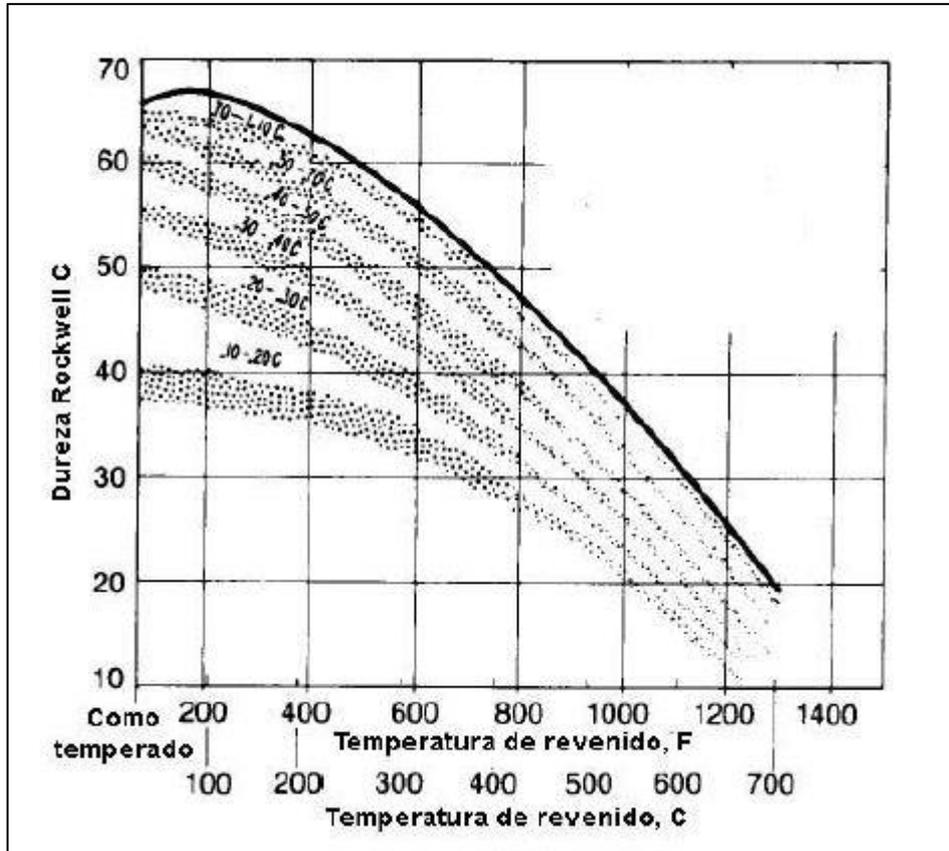
2.2.2 Revenimento

O tratamento térmico de revenimento é um processo de aquecimento do aço, após a têmpera, a uma temperatura abaixo da faixa de transformação. O objetivo é a redução da fragilidade e das tensões internas provocadas pela têmpera, resultando em melhoria da ductilidade e da resistência à tração, com uma pequena redução da dureza do aço.

Pode-se dizer que todos os aços que passam por um tratamento de têmpera devem receber também tratamento de revenimento. O aquecimento em temperaturas abaixo da temperatura crítica melhora a tenacidade das estruturas martensíticas; sendo assim, o balanço entre a dureza e a tenacidade exigida determina as condições de revenimento para cada aplicação.

Na Figura 2 é possível visualizar a maneira como a dureza decresce de uma dureza máxima, obtida após a têmpera com a microestrutura martensítica, conforme é aumentada a temperatura do revenimento. Também, pode-se observar o efeito do carbono na camada cementada no resultado de dureza obtida após o revenimento, sendo uma baixa dureza associada aos aços de baixo carbono (KRAUSS, 1990).

Figura 2 - Curvas de dureza em função da temperatura de revenido para diferentes variações de carbono



Fonte: Krauss, 1990.

Como pode ser visto, quando é desejada a máxima dureza no aço após o revenimento, a temperatura selecionada para este tratamento térmico deve estar na faixa de 150 e 200°C (KRAUSS, 1990). A microestrutura obtida em um aço que, após a têmpera passou por um revenimento é denominada martensita revenida.

LANA (2010) realizou em sua pesquisa o tratamento de revenimento à temperatura de 170°C durante 90 minutos, em aços SAE 8620, DIN 16MnCr5 e DIN 20MnCr5.

GIORDANI (2012) efetuou o revenimento à temperatura de 180° durante 60 minutos, em aços SAE 8620 e SAE 1020.

SIMÕES (2007) utilizou temperatura de 180°C e tempo de 120 minutos para o revenimento em aço SAE 8620H.

2.3 Aço SAE 1020

CALLISTER (2002) define aços carbono como ligas de ferro-carbono contendo geralmente entre 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação. Aço de baixo carbono é aquele que possui teor de carbono inferior à 0,3% e são aços que possuem grande ductilidade, bons para a construção mecânica e soldagem. Na Tabela 1 é possível visualizar a composição química de alguns aços de baixo carbono de acordo com a norma ABNT-NBR NM 87.

Tabela 1 - Composição química de alguns aços de baixo carbono

Designación COPANT del acero/ <i>Designação COPANT do aço</i>	Composición química de colada / <i>Composição química de corrida</i> (%)			
	Carbono (C)	Manganeso / <i>Manganês</i> (Mn)	Fósforo (P) máx.	Azufre / <i>Enxofre</i> (S) máx.
1010	0,08-0,13	0,30-0,60	0,040	0,050
1012	0,10-0,15	0,30-0,60	0,040	0,050
1013	0,11-0,16	0,50-0,80	0,040	0,050
1015	0,13-0,18	0,30-0,60	0,040	0,050
1016	0,13-0,18	0,60-0,90	0,040	0,050
1017	0,15-0,20	0,30-0,60	0,040	0,050
1018	0,15-0,20	0,60-0,90	0,040	0,050
1019	0,15-0,20	0,70-1,00	0,040	0,050
1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,040	0,050
1021	0,18-0,23	0,60-0,90	0,040	0,050
1022	0,18-0,23	0,70-1,00	0,040	0,050

Fonte: Adaptado de ABNT-NBR NM 87:2000.

O aço SAE 1020 é um dos aços de baixo carbono mais comumente utilizado como aço para cementação, com excelente relação custo-benefício quando comparado a aços com elementos de liga, para este mesmo objetivo. São aços carbonos de ligas metálicas constituídas basicamente de ferro, carbono (0,20%), silício e manganês, apresentando também outros elementos inerentes ao processo de fabricação.

Em seu estado normalizado a microestrutura encontrada é perlita fina e ferrita. Devido ao seu baixo teor de carbono possui baixa temperabilidade, que é a capacidade de obter a microestrutura martensita durante o tratamento térmico de têmpera, por isso, o aço SAE 1020 é muito utilizado para tratamento termoquímico de

cementação, pois assim ocorre um aumento da temperabilidade, obtendo melhores resultados de dureza superficial após a têmpera (CALLISTER, 2002).

O aço SAE 1020 possui baixa resistência mecânica em seu estado natural, porém, executando os procedimentos corretos de cementação, têmpera e revenimento, estas propriedades podem ser aprimoradas; podendo assim ser utilizado para a fabricação de engrenagens, tubos, eixos, pinos guia, anéis de engrenagem, entre outros (GERDAU).

2.4 Cinza da Casca de Arroz (CCA)

O processo de obtenção do arroz resulta em uma enorme quantidade de casca de arroz, e seu aproveitamento como combustível para usinas de geração de energia já é uma prática comum no município de Alegrete/RS. Segundo informações do Instituto Rio Grandense dos Arrozeiros (IRGA), o município produz cerca de 437.000 toneladas de arroz por ano. Dado que a cada 36 toneladas de arroz produzido, 1 tonelada é casca (ALI et al., 1992), estima-se que Alegrete é responsável por gerar aproximadamente 110.000 toneladas de casca de arroz por ano.

TASHIMA (2006) assegura que a casca de arroz é composta normalmente por 50% de celulose, 30% de lignina e 20% de sílica. Porém, durante o processo de combustão da casca de arroz a matéria orgânica é perdida, restando sílica e algumas impurezas como carbono, potássio, cálcio e sódio.

O processo de queima sem controle de casca, em usinas termoelétricas, resulta em uma cinza cristalina. CORDEIRO (2006) afirma que essa cinza produzida nas caldeiras apresenta normalmente coloração escura, pelo elevado teor de carbono.

Segundo CHANDRASEKHAR et al. (2003), a queima parcial provoca a decomposição da parte orgânica e a quebra de suas ligações, gerando assim uma cinza com certo teor de carbono e, por isso, de cor preta.

3 METODOLOGIA

Na seguinte seção da pesquisa são descritas as metodologias e os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados. Esse estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada, visto que se propõe a analisar um determinado método de tratamento termoquímico empregado em aços. Realizada com procedimentos experimentais, para controle e avaliação dos resultados. Possui objetivos explicativos, pois propõe-se a avaliar e explicar fenômenos, relacionando causa e consequência.

O trabalho teve como objetivo realizar o processo de tratamento termoquímico de cementação sólida em um forno mufla. E, por meio de ensaios experimentais, elaborar uma análise comparativa, utilizando cinza de casca de arroz e carvão vegetal como fontes de carbono.

Para uma melhor organização e qualidade no desenvolvimento da pesquisa, foi seguido o fluxograma da Figura 3, onde todos os procedimentos experimentais realizados foram fundamentados com a teoria (revisão bibliográfica).

Figura 3 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Próprio autor, 2018.

3.1 Materiais

O material utilizado nesse estudo trata-se do aço SAE 1020, adquirido no Laboratório de Máquinas da Unipampa - Campus Alegrete. O material foi adquirido em forma de barras cilíndricas com 1/2" (12,7 mm) de diâmetro, apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Material para confecção das amostras



Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Tabela 2 encontra-se a composição química do aço SAE 1020 prevista na norma NBR NM 87.

Tabela 2 - Composição química aço SAE 1020

Elemento	C		Mn		P		S	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
%	0,18	0,23	0,3	0,6	0	0,04	0	0,05

Fonte: NBR NM 87

Para verificação da composição química do material foi realizado ensaio com 3 amostras do aço SAE 1020 no Laboratório de Pós-Graduação da Unipampa, utilizando Espectrômetro de Emissão Óptica B2-Advanced apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Espectrômetro B2-Advanced



Fonte: Próprio autor, 2018.

3.2 Tratamento Termoquímico de Cementação Sólida

Os tratamentos termoquímicos de cementação foram realizados em um forno Mufla da marca INTI, modelo FL 1300/7E, no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos e Superficiais da Unipampa. A Figura 6 mostra o forno utilizado.

Figura 6 - Forno Mufla FL 1300/7E



Fonte: Próprio autor, 2018.

Foram realizadas 8 condições de cementação, variando entre elas o meio cementante, a temperatura e o tempo de tratamento. A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados para os tratamentos termoquímicos de cementação.

Tabela 3 - Parâmetros tratamentos termoquímicos de cementação

Seção	Condição	Meio Cementante	Temperatura [°C]	Tempo [horas]
1	1	Carvão	900	8
	2	Cinza	900	8
2	3	Carvão	900	15
	4	Cinza	900	15
3	5	Carvão	950	8
	6	Cinza	950	8
4	7	Carvão	950	15
	8	Cinza	950	15

Fonte: Próprio autor, 2018.

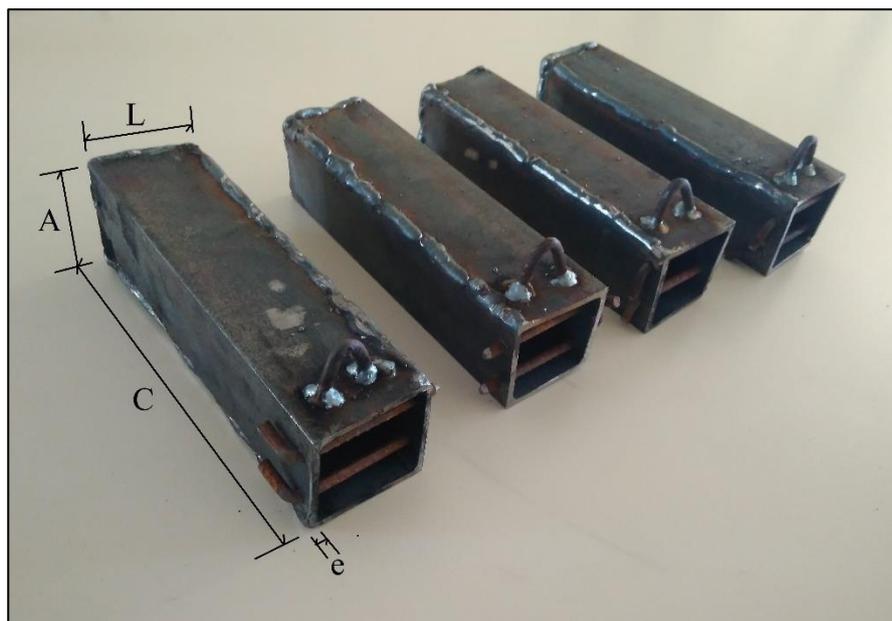
As 8 condições de cementação foram separadas em 4 “seções” com mesma temperatura e tempo de tratamento, otimizando a utilização do forno mufla. Em cada condição foram utilizados 6 corpos de provas.

3.2.1 Confeção de Caixa para Cementação

Para a realização dos procedimentos de cementação, fez-se necessário a fabricação de caixas com dimensões adequadas às dimensões internas do forno mufla.

Nesta etapa foram adquiridas cantoneiras de aço carbono com ângulo reto e abas iguais, com espessura (e) de 3 mm e 2” (50,8 mm) de largura (L = A). Realizou-se o seccionamento das cantoneiras com 200 mm de comprimento (C), e, utilizando processo de soldagem, foram confeccionadas quatro caixas para utilizar nos procedimentos experimentais, apresentadas na Figura 7.

Figura 7 - Caixas confeccionadas para cementação



Fonte: Próprio autor, 2018.

3.2.2 Preparação das Misturas de Cementação

Os tratamentos termoquímicos foram realizados com duas fontes de carbono diferentes, carvão vegetal e cinza de casca de arroz. A cinza foi obtida na Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda. (CAAL), após resultar da queima da casca de arroz utilizada como combustível na usina termoelétrica. Essa cinza é de granulação fina e coloração escura, e pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 - Cinza da casca de arroz



Fonte: Próprio autor, 2018.

A preparação das misturas de cementação foi realizada de acordo com CHIAVERINI (2008), onde é indicado o uso de ativadores para potencializar a formação de CO_2 durante a cementação. O ativador utilizado nesse trabalho foi carbonato de sódio (Na_2CO_3), representando 15% das misturas de cementação.

Para a preparação do carvão vegetal fez-se a moagem do carvão (a), seguida de peneiramento em malha de 1,2mm (b), resultando em um pó de granulometria fina (c). Esse processo está ilustrado na Figura 9.



Fonte: Próprio autor, 2018.

A mistura de cementação com cinza de casca de arroz tem aproximadamente 70 gramas, onde, 60 g é cinza e 10 g é carbonato de sódio.

A mistura de cementação com carvão vegetal tem aproximadamente 165 gramas, onde, 140 g é carvão vegetal e 25 g é carbonato de sódio.

3.3 Tratamento Térmico de Têmpera e Revenido

Os tratamentos térmicos de têmpera e revenimento foram realizados no forno mufla, apresentado na Figura 6, o mesmo utilizado para os processos de cementação. Para esses procedimentos foram utilizados dois corpos de prova de cada uma das oito condições

A têmpera foi realizada após a austenitização, à temperatura de 900°C , com tempo de encharque (homogeneização da temperatura) de 30 minutos. Após, o resfriamento ocorreu em água com leve agitação.

O revenimento ocorreu à temperatura de 180°C , permanecendo no interior do forno durante 1 hora, seguido de resfriamento ao ar livre.

3.4 Análise Metalográfica

Para a avaliação microestrutural das amostras cementadas e temperadas, foi empregada a preparação metalográfica padrão. Todos os equipamentos utilizados estão localizados no Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos e Superficiais da Unipampa.

Inicialmente, é realizado o corte das diferentes amostras, utilizando uma cortadora metalográfica de precisão Isomet 1000 (Figura 10) da marca Buehler, para seccionamento de amostras. Ela possui discos de corte diamantados e um sistema de corte pendular por gravidade, o que proporciona baixa deformação plástica. Possui ainda, velocidade variável e regulável de 100 a 975 rpm, com variações de 25 rpm, e uma capacidade de corte de até 38 mm. E conta com um ajuste de carga mecânica por pesos de 0 a 500 g.

Figura 10 - Cortadora metalográfica Isomet 1000



Fonte: BUEHLER, 2018.

Na sequência, realiza-se o embutimento das amostras seccionadas, que é feito a quente, utilizando baquelite em uma embutidora digital da marca Fortel, modelo ED30, ilustrada na Figura 11, com controle de pressão manual e com aquecimento e resfriamento automático. A pressão de trabalho neste equipamento é de 1000 lbf/pol².

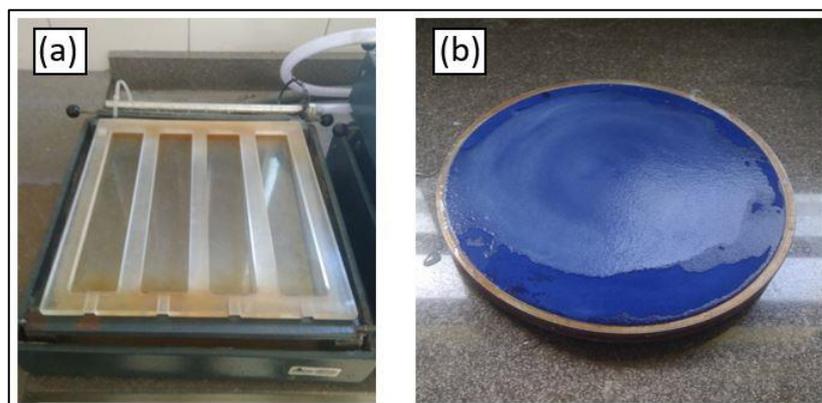
Figura 11 - Embutidora EFD30



Fonte: Próprio autor, 2018.

Após o embutimento, há a etapa de lixamento das amostras, com lixas de granulometrias 80, 120, 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2000 grãos/pol². Entre cada troca de lixa efetua-se um rotacionamento de 90° da amostra. Para que possa seguir para a lixa seguinte é necessário que todas as marcas do lixamento anterior tenham sido eliminadas na atual lixa. Para esse procedimento foi utilizada uma lixadeira manual de modelo LMF da marca Fortel, com 4 pistas de lixamento, um sistema de aspersão de água corrente sobre as pistas e uma saída para recolhimento da água. Concluídas as etapas de lixamento as amostras são devidamente polidas utilizando um pano de polimento e óxido de alumínio de 1 µm (Alumina). Na Figura 12 são apresentados: (a) lixadeira, (b) pano de polimento.

Figura 12 – Lixadora e pano de polimento



Fonte: Próprio autor, 2018.

Finalizado o polimento das amostras, é exercido um ataque químico, utilizando reagente Nital 2%. Cada amostra foi imersa individualmente durante 5 segundos, em um recipiente contendo o reagente. Após o ataque químico, as amostras foram lavadas com álcool etílico e, em seguida, secas com ar quente forçado, eliminando possíveis impurezas que dificultassem a visualização da superfície atacada.

3.4.1 Microscopia Óptica (MO)

Para a aquisição das micrografias, foi utilizado o microscópio óptico (MO) da marca Kontrol modelo IM 713, equipado com câmera e microcomputador com software para registro de imagens, mostrado na Figura 13 e situado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa. Foram coletadas imagens na ampliação 400x.

Figura 13 - Microscópio óptico IM 713 e microcomputador



Fonte: Próprio autor, 2018.

3.5 Ensaios Mecânicos

Para avaliar a resistência mecânica das amostras, foram efetuados ensaios de microdureza Vickers (HV) e ensaios de desgaste abrasivo. E, através do desvio padrão nos ensaios, foi realizada análise estatísticas dos dados.

3.5.1 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado utilizando um microdurômetro Buehler modelo MicroMet 6010, localizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Unipampa, apresentado na Figura 14.

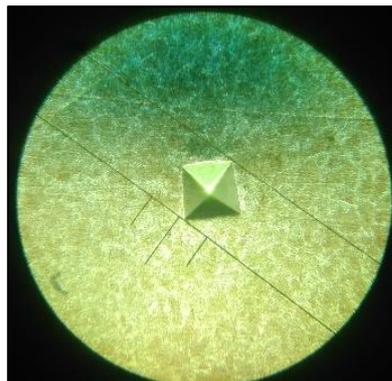
Figura 14 - Microdurômetro Buehler



Fonte: FANTINELI, 2015.

A Figura 15 mostra a visão ocular do microdurômetro, onde é possível visualizar uma indentação realizada em uma amostra.

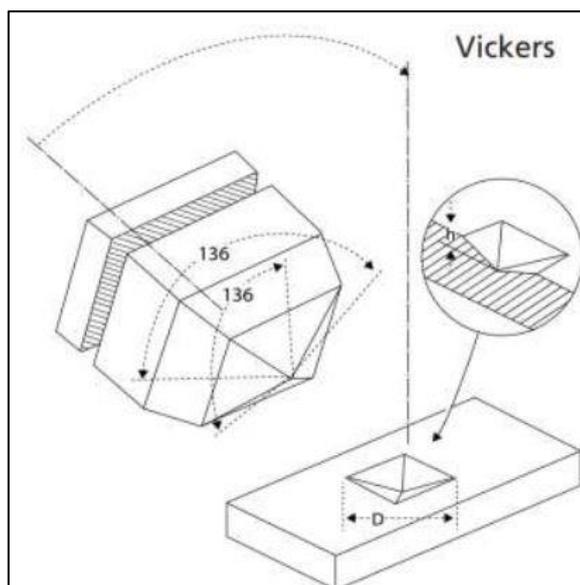
Figura 15 - Indentação HV 0,5kg 500x



Fonte: Próprio autor, 2018.

Como é possível visualizar na figura anterior, é criada uma marca em formato piramidal com base quadrada, e profundidade de aproximadamente um sétimo do comprimento da diagonal (BUEHLER SUMMET, 2013, p. 105). Na Figura 16 é demonstrada a geometria do indentador utilizado na escala Vickers.

Figura 16 - Geometria do indentador Vickers



Fonte: BUEHLER SUMMET, 2013.

O valor da dureza é obtido através da aplicação de uma carga, inserindo o indentador piramidal de diamante na superfície da amostra. O software do equipamento realiza a leitura das diagonais da endentação, determinando o valor da dureza em escala Vickers (HV). A dureza Vickers pode ser calculada com a Equação 5.

$$HV = \frac{2L \operatorname{sen}(136^\circ/2)}{d^2} \cong \frac{1854,4 L}{d^2} \quad (5)$$

O ensaio de microdureza foi realizado com as amostras embutidas, polidas e lixadas, procedimentos estes que foram descritos anteriormente nesse trabalho.

O perfil de microdureza é traçado ao longo de todo o diâmetro da amostra com 17 indentações, tendo o objetivo de melhor identificar a camada com maior dureza, que é obtida com os processos de cementação e têmpera.

As distâncias menores entre as indentações na região próxima à superfície da amostra foram mantidas, pois nessa região a variação da dureza é maior; já no interior da amostra a dureza não sofre muita alteração, mantendo-se próxima a dureza do material sem tratamento térmico.

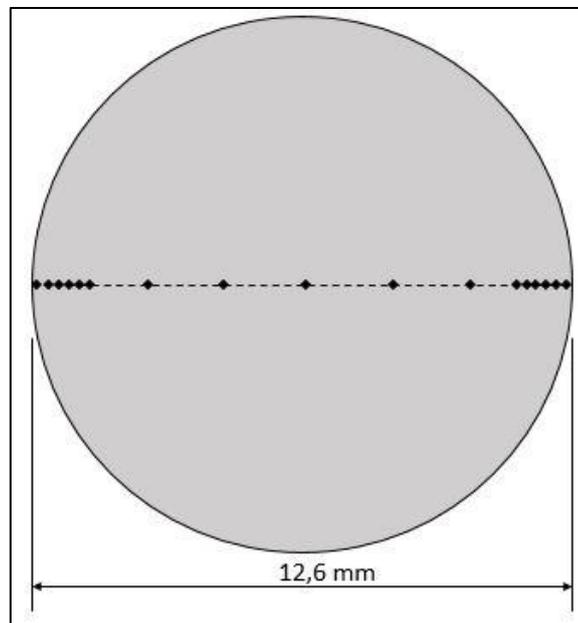
O esquema dos perfis de microdureza e as distâncias entre as indentações estão apresentadas na Tabela 4, e podem ser melhores interpretadas através da Figura 17.

Tabela 4 - Detalhamento do ensaio de microdureza

Número da endentação	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Profundidade [mm]	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	2,3	4,3	6,3	8,3	10,3	11,5	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5

Fonte: Próprio autor, 2018.

Figura 17 - Ilustração do perfil de microdureza



Fonte: Próprio autor.

Então, fez-se a medição de três perfis de microdureza em cada amostra e determinado o perfil médio de microdureza.

A carga utilizada nos ensaios foi de 0,5kg aplicada durante 10 segundos. A carga de 0,5kg foi selecionada com base nos estudos de FANTINELI (2015), onde foram realizados ensaios de microdureza com cargas variadas e essa apresentou o menor desvio padrão. Para a execução dos ensaios de microdureza, a norma ABNT NBR NM 6507:2008 foi seguida.

3.5.2 Ensaio de Desgaste

O ensaio de desgaste abrasivo foi realizado no Laboratório de Máquinas da Unipampa, utilizando o equipamento mostrado na Figura 18, da marca Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, e auxiliado de um microcomputador para programação e controle dos ensaios. O objetivo do ensaio é identificar a melhoria da resistência ao desgaste do material com os tratamentos térmicos.

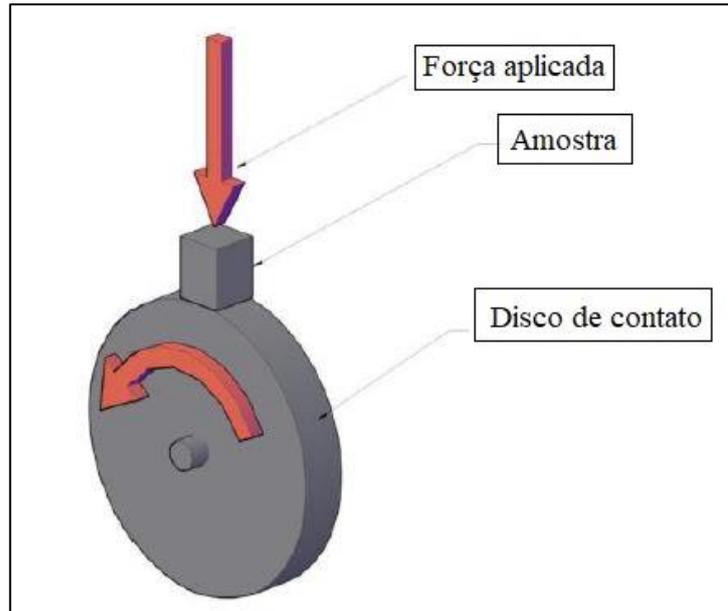
Figura 18 – Equipamento para ensaio de desgaste



Fonte: Próprio autor, 2018.

O equipamento funciona com um princípio de “bloco sobre o anel” (*Block on ring*), onde a superfície da amostra é friccionada contra um disco coberto por lixa abrasiva, que está em movimento de rotação, enquanto a amostra encontra-se fixa no suporte. Este processo é melhor ilustrado pela Figura 19.

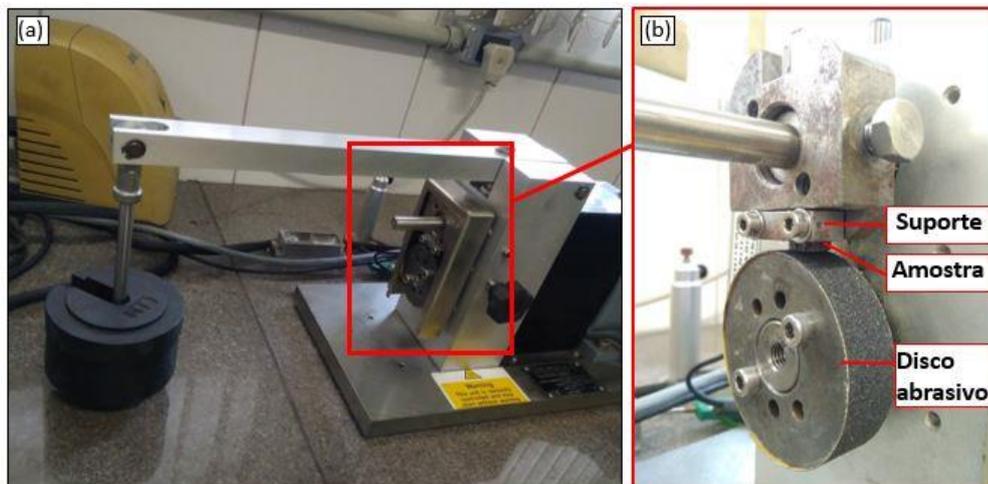
Figura 19 - Esquema de funcionamento ensaio de desgaste



Fonte: Adaptado de FONTINELI, 2018.

Durante os ensaios, as amostras ficam presas em um suporte e por isso devem ser cortadas com um comprimento de 12,7 mm. A Figura 20 (a) ilustra o equipamento utilizado, onde é possível visualizar os discos de cargas responsáveis pela aplicação da força sobre a amostra, e em (b) o sistema onde a amostra é fixada no suporte e fica posicionada sobre o disco abrasivo, com ampliação.

Figura 20 - Equipamento ensaio desgaste



Fonte: Próprio autor, 2018.

Foram realizados três ensaios em cada uma das 8 condições de tratamento térmico (Tabela 3), para assim encontrar o desgaste superficial médio em cada uma das condições. Para cada ensaio o equipamento foi limpo e a lixa substituída.

Os parâmetros para a realização dos ensaios de desgaste superficial foram determinados através dos métodos adotados por FONTINELI (2015) em sua pesquisa, e estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros para ensaio de desgaste abrasivo

Ensaio Desgaste Superficial	
Velocidade [RPM]	50
Força [N]	189
Carga Aplicada [Kg]	3
Número de Ciclos	300
Diâmetro do disco de desgaste [mm]	60
Granulometria da lixa [Grãos/pol ²]	120
Comprimento do corpo de prova [mm]	12,7

Fonte: Próprio autor, 2018.

Para determinar o desgaste superficial de cada amostra após o ensaio, é utilizada a Equação 6, onde o desgaste é quantificado pela perda de massa percentual em relação à massa inicial.

$$Pm = \frac{mi - mo}{mi} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

Pm = Perda de massa [%];

mi = Massa inicial [g];

mo = Massa da amostra após o ensaio [g].

Para obter a massa de cada amostra, foi utilizada uma balança analítica da marca Shimadzu modelo AY220, com resolução de 0,001 g. As amostras foram limpas e pesadas antes e após cada ensaio. O equipamento, mostrado na Figura 21, encontra-se no laboratório de química da Unipampa.

Figura 21 - Balança Shimadzu AY220



Fonte: Próprio autor, 2018.

4 RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e análises metalográficas realizadas no aço SAE 1020, após os tratamentos termoquímicos e térmicos.

4.1 Composição do aço SAE 1020

Através da espectroscopia de emissão óptica foram obtidas as médias dos elementos químicos constituintes do aço SAE 1020 utilizado na pesquisa, esses estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química aço SAE 1020 utilizado

Elemento	C	Mn	P	S
%	0,1864	0,4309	0,0068	0,1194

Fonte: Próprio autor, 2018.

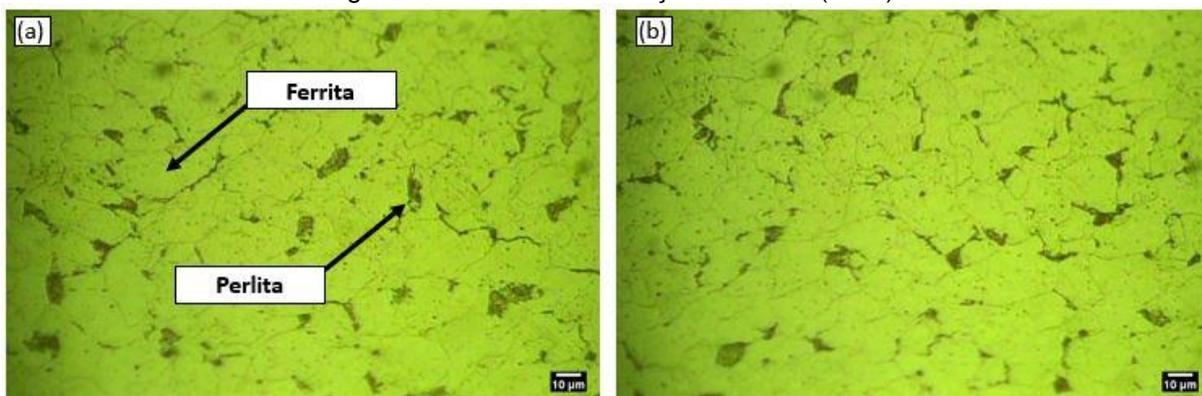
Através dos dados apresentados, é possível observar que estão presentes todos os principais elementos citados pela norma, em teores dentro da faixa recomendada, apenas o enxofre ficou um pouco acima do valor especificado, podendo assim, se afirmar que o material utilizado se trata de aço SAE 1020.

4.2 Microscopia Óptica

Através da metodologia apresentada no capítulo 3, foram coletadas imagens no microscópio óptico na ampliação 400x.

A Figura 22 apresenta a microestrutura do aço SAE 1020 utilizado na pesquisa, formada por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras), em (a) a superfície da amostra e em (b) o núcleo.

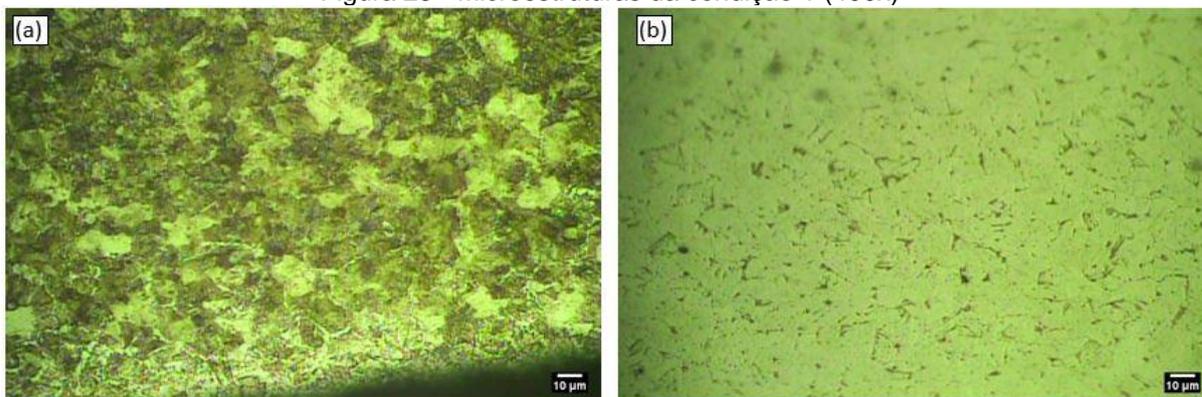
Figura 22 - Microestrutura aço SAE 1020 (400x)



Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 23 apresenta as microestruturas da condição 1 (Carvão 900°C 8h), em (a) é visualizada a superfície da amostra, e em (b) o núcleo.

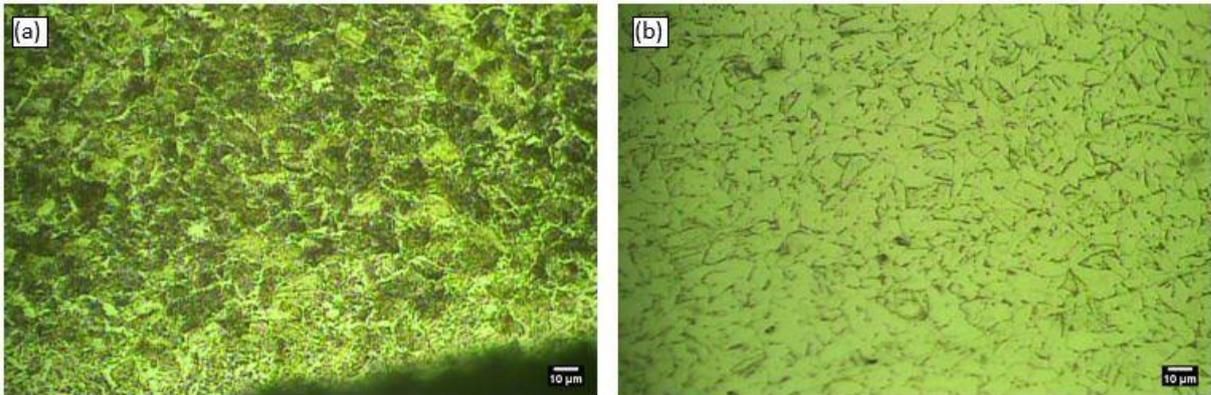
Figura 23 - Microestruturas da condição 1 (400x)



Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 24 estão apresentadas as microestruturas da condição 2 (Cinza 900°C 8h), em (a) a superfície da amostra e em (b) o núcleo.

Figura 24 - Microestruturas da condição 2 (400x)

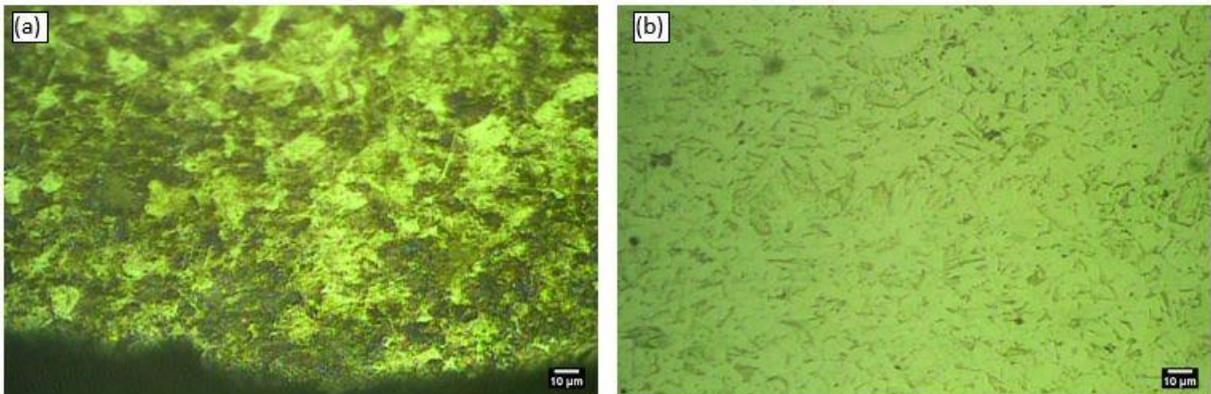


Fonte: Próprio autor, 2018.

Analisando as microestruturas das Figuras 22 e 23, condições 1 e 2 respectivamente, nota-se uma diferença microestrutural entre as superfícies e o núcleo, isso deve-se ao processo de cementação. As imagens mostram que a superfície carbonetada não foi atingida pela têmpera, formando uma microestrutura de perlita e ferrita, e não apresenta descarbonetação superficial. A principal mudança microestrutural observada, é o aumento da quantidade de perlita.

As microestruturas da condição 3 (Carvão 900°C 15h) estão apresentadas na Figura 25, em (a) a superfície e em (b) o núcleo.

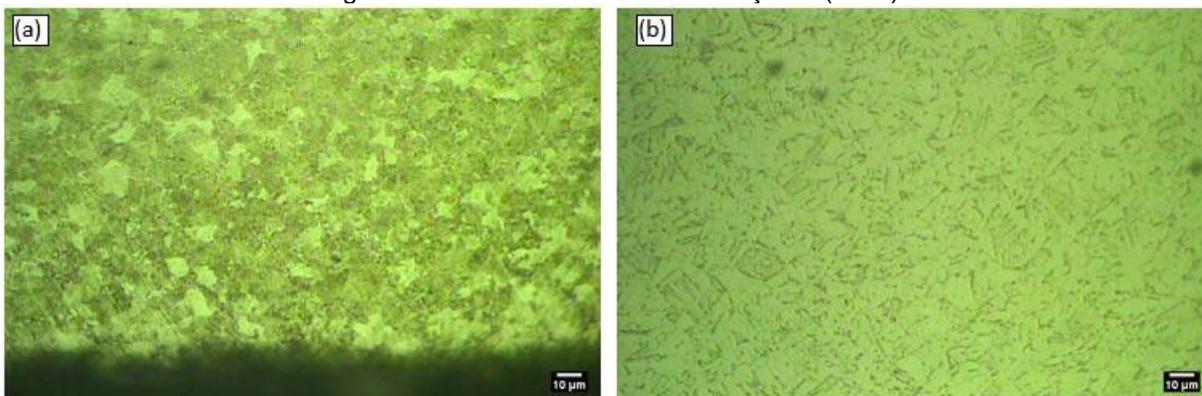
Figura 25 - Microestruturas da condição 3 (400x)



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 26 estão apresentadas as microestruturas da condição 4 (Cinza 900°C 15h), em (a) a superfície e em (b) o núcleo da amostra.

Figura 26 - Microestruturas da condição 4 (400x)

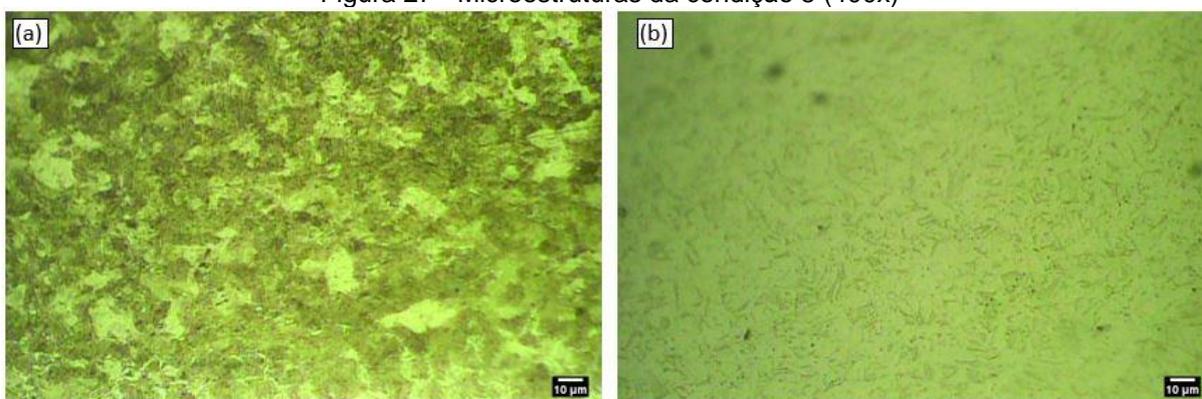


Fonte: Próprio autor, 2018.

Observando as imagens metalográficas (Figuras 24 e 25) das condições 3 e 4, nota-se que a superfície carbonetada apresenta uma estrutura de perlita, o que evidencia que a têmpera não teve transformação de martensita. A região superficial apresentou um aumento da quantidade de perlita na microestrutura, sendo essa formada basicamente por ferrita e perlita. As superfícies das amostras não apresentaram descarbonetação. Comparando as amostras das condições 3 e 4, é possível observar que a cementação feita com a cinza da casca de arroz (condição 4) apresenta menor quantidade de ferrita e grãos menores do que a cementação feita com o carvão (condição 3).

As microestruturas da condição 5 (Carvão 950°C 8h) estão apresentadas na Figura 27, onde, em (a) visualiza-se a superfície da amostra, e em (b) o núcleo.

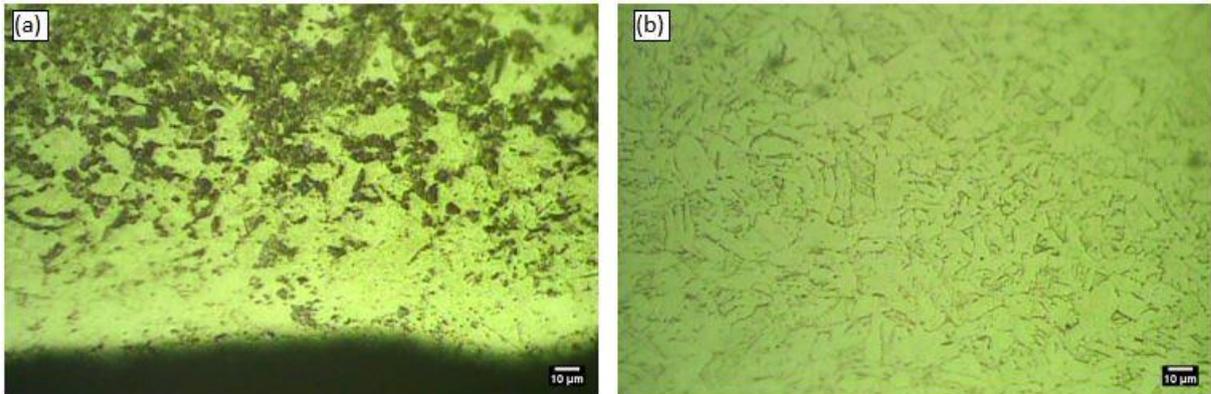
Figura 27 - Microestruturas da condição 5 (400x)



Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 28, estão apresentadas a microestrutura da superfície em (a) e do núcleo em (b), da condição 6 (Cinza 950°C 8h).

Figura 28 - Microestruturas da condição 6 (400x)

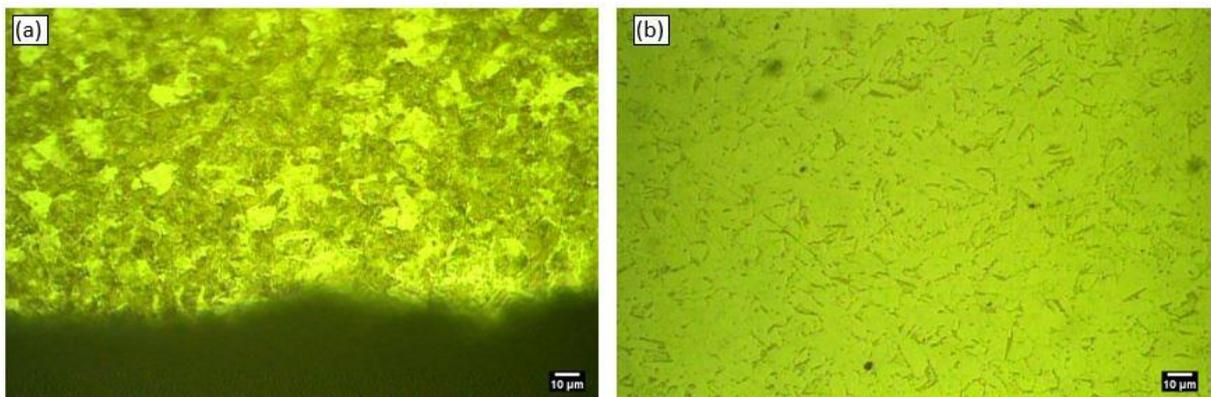


Fonte: Próprio autor, 2018.

Através das imagens metalográficas das condições 5 e 6 (Figuras 26 e 27), observa-se que a superfície carbonetada não foi atingida completamente pela têmpera, apresentando uma estrutura de perlita. As microestruturas são formadas basicamente por ferrita e perlita, tendo um aumento de perlita após os tratamentos térmicos empregados. Na Figura 27 (a) é observada uma descarbonetação superficial na amostra que passou por cementação com cinza da casca de arroz.

As microestruturas da condição 7 (Carvão 950°C 15h) estão apresentadas na Figura 29, onde, em (a) é apresentada a superfície e em (b) o núcleo da amostra.

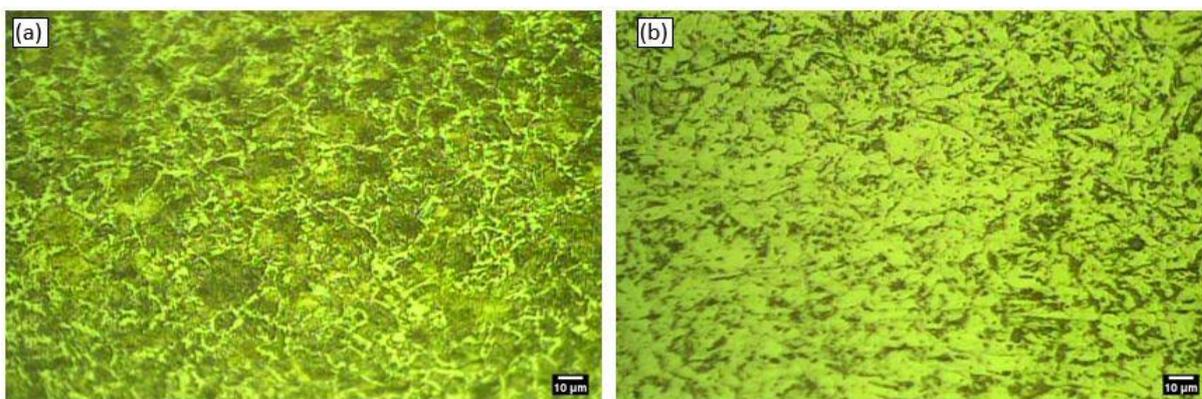
Figura 29 - Microestruturas da condição 7 (400x)



Fonte: Próprio autor, 2018.

Por fim, na Figura 30 estão apresentadas as microestruturas da condição 8 (Cinza 950°C 15h), em (a) é possível visualizar a microestrutura da superfície, e em (b) do núcleo da amostra.

Figura 30 - Microestruturas da condição 8 (400x)



Fonte: Próprio autor, 2018.

Analisando as microestruturas das Figuras 28 e 29, condições 7 e 8 respectivamente, nota-se que a superfície carbonetada não foi atingida completamente pela têmpera, formando perlita, e não é identificada descarbonetação superficial das amostras. A mudança microestrutural observada é o aumento da quantidade de perlita. As microestruturas são formadas basicamente de ferrita e perlita, e, comparando as condições 7 e 8 cementadas com carvão e cinza da casca de arroz, respectivamente, à 950°C durante 15 horas, observa-se que na amostra que passou por cementação com cinza da casca de arroz apresenta menor quantidade de ferrita e grãos menores.

De maneira geral, a não formação de martensita, resultando em uma possível martensita de baixo carbono com o tratamento térmico de têmpera, é explicada devido à baixa temperabilidade do aço SAE 1020. Mesmo para uma velocidade de resfriamento muito elevada, não foi possível obter uma quantidade significativa de martensita. Pelo fato de o aço possuir baixo teor de carbono e ausência de elementos de liga, o “cotovelo” da transformação do diagrama TTT (Figura 1) é deslocado para a esquerda, dificultando a transformação da austenita em martensita.

4.3 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3 deste trabalho, apresentando os resultados na escala Vickers (HV), com uma carga de 0,5kg.

O aço SAE 1020 sem tratamento térmico apresentou dureza média de 135,42 HV uniforme, com um desvio padrão médio de 2,17.

A Tabela 7 apresenta os resultados médios de microdureza e o desvio padrão para o aço 1020 sem tratamento térmico e para as condições 1 e 2, utilizando como meio cementante carvão e cinza da casca de arroz, respectivamente, à 900°C durante 8 horas, seguidos de têmpera e revenimento.

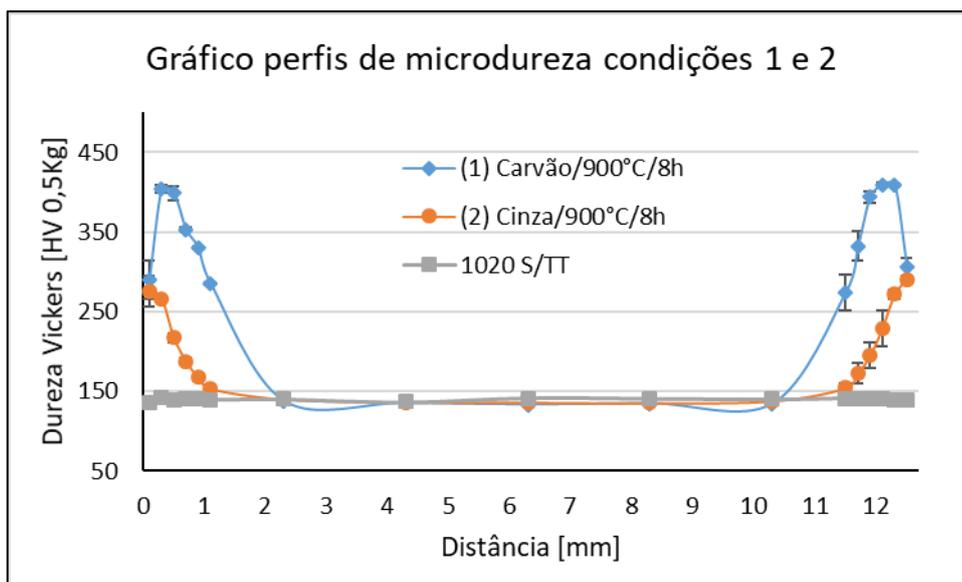
Tabela 7 - Resultados Microdureza Condições 1 e 2

Endentação	Distância [mm]	Condição 1		Condição 2		Aço 1020	
		Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.
1	0,1	289,83	23,931	276,13	19,55	135,8	2,16
2	0,3	404,17	4,235	266,47	1,1557	142,33	1,51
3	0,5	398,87	8,6396	217,43	5,32	139,86	1,94
4	0,7	353,27	1,8927	187,83	4,1987	141,1	2,49
5	0,9	330,07	2,1638	167,4	4,5085	140,4	0,98
6	1,1	285,4	1,6753	153,43	5,495	139,86	1,08
7	2,3	137,6	0,5099	140,23	1,676	140,06	0,97
8	4,3	135,33	1,9872	136,3	2,1182	136,73	2,17
9	6,3	133,3	1,7907	136,2	1,2832	141,5	4,97
10	8,3	134,77	2,3977	135,27	1,1086	140,93	6,66
11	10,3	134,3	0,3559	137,93	0,834	140,23	5,13
12	11,5	274,1	22,595	154,43	6,2914	141,43	5,49
13	11,7	332,57	19,163	172,83	12,108	141	6,42
14	11,9	393,97	7,0225	195,17	16,514	141,36	2,17
15	12,1	409	2,3847	229,8	22,451	140,66	2,34
16	12,3	409,33	1,4522	271,77	5,8659	139,16	2,69
17	12,5	306,17	10,524	290	4,8689	138,96	1,47

Fonte: Próprio autor, 2018.

Estes valores estão apresentados em um gráfico na Figura 31. É possível observar uma melhora significativa da dureza nas superfícies do aço.

Figura 31 - Perfis de microdureza condições 1 e 2



Fonte: Próprio autor, 2018.

O aumento da dureza é maior para a condição 1, obtendo a maior dureza de $404,17 \pm 4,23$ HV (endentação 2) e $409,33 \pm 1,45$ HV (endentação 16), ambas à 0,3 mm da superfície. Na condição 2, a maior dureza encontrada foi de $276,13 \pm 19,55$ HV (indentação 1) e $290 \pm 4,86$ HV (indentação 17), ambas à 0,1 mm da superfície. No núcleo a dureza se manteve próxima à dureza do aço SAE 1020 sem tratamento térmico, aproximadamente 135 HV.

A Tabela 8 apresenta os resultados médios de microdureza e o desvio padrão para o aço 1020 sem tratamento térmico e para as condições 3 e 4, utilizando como meio cementante carvão e cinza da casca de arroz, respectivamente, à 900°C durante 15 horas, seguidos de têmpera e revenimento.

Tabela 8 - Resultado microdureza condições 3 e 4

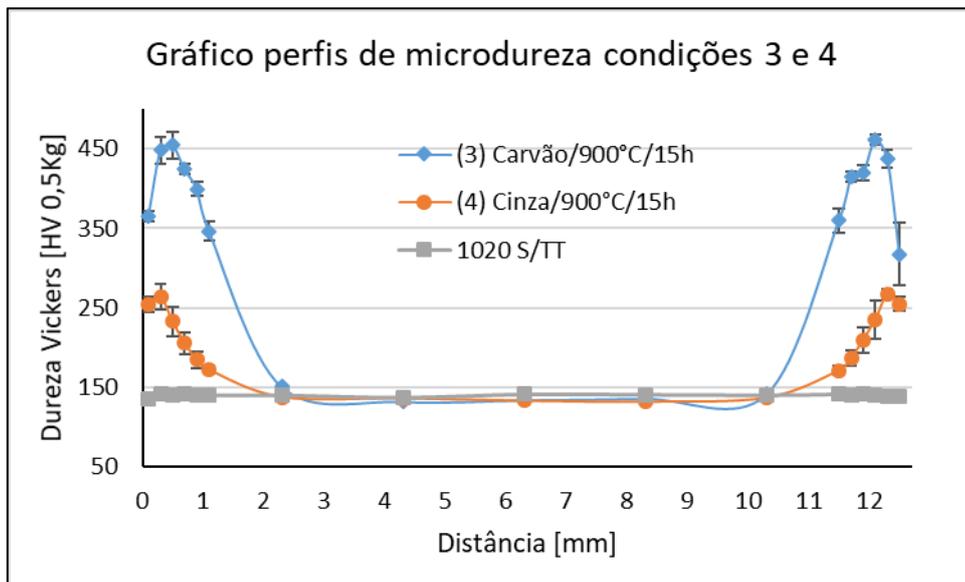
Endentação	Distância [mm]	Condição 3		Condição 4		Aço 1020	
		Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.
1	0,1	364,9	6,1595	254,17	9,6562	135,8	2,16
2	0,3	447,97	17,115	264,17	16,352	142,33	1,51
3	0,5	454,33	17,273	232,67	18,093	139,86	1,94
4	0,7	424,03	6,2056	205,43	14,121	141,1	2,49
5	0,9	399,27	9,1149	184,5	10,584	140,4	0,98
6	1,1	346,5	11,681	172,13	4,5065	139,86	1,08

7	2,3	151,03	1,9362	137,77	3,4702	140,06	0,97
8	4,3	132,23	0,7364	136,13	1,3888	136,73	2,17
9	6,3	134,27	0,9809	133,07	0,2867	141,5	4,97
10	8,3	136,2	7,1091	131,83	1,4522	140,93	6,66
11	10,3	141,2	1,699	136,9	4,0915	140,23	5,13
12	11,5	359,73	15,277	171,4	5,4412	141,43	5,49
13	11,7	415,3	6,5914	186,8	9,9442	141	6,42
14	11,9	419,4	10,173	209,67	15,922	141,36	2,17
15	12,1	461,63	6,5799	235,03	23,708	140,66	2,34
16	12,3	437,23	11,288	266,53	6,3636	139,16	2,69
17	12,5	317,3	39,073	254,9	8,8465	138,96	1,47

Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 32 são apresentados os gráficos de perfil de dureza para as condições 3 e 4 e do aço 1020 sem tratamento térmico.

Figura 32 - Perfis de microdureza condições 3 e 4



Fonte: Próprio autor, 2018.

Nota-se uma melhora nos valores de dureza na superfície do material em ambas as condições 3 e 4. A condição 3 apresentou melhores resultados, tendo seu valor máximo de $454,33 \pm 17,27$ HV (indentação 3) e $461,63 \pm 6,57$ HV (indentação 15). Na condição 4 o maior valor de dureza encontrado foi de $264,17 \pm 16,35$ HV (indentação 2) e $266,53 \pm 6,36$ HV (indentação 16).

A Tabela 9 apresenta os resultados médios de microdureza e o desvio padrão para o aço 1020 sem tratamento térmico e para as condições 5 e 6, utilizando como meio cementante carvão e cinza da casca de arroz, respectivamente, à 950°C durante 8 horas, seguidos de têmpera e revenimento.

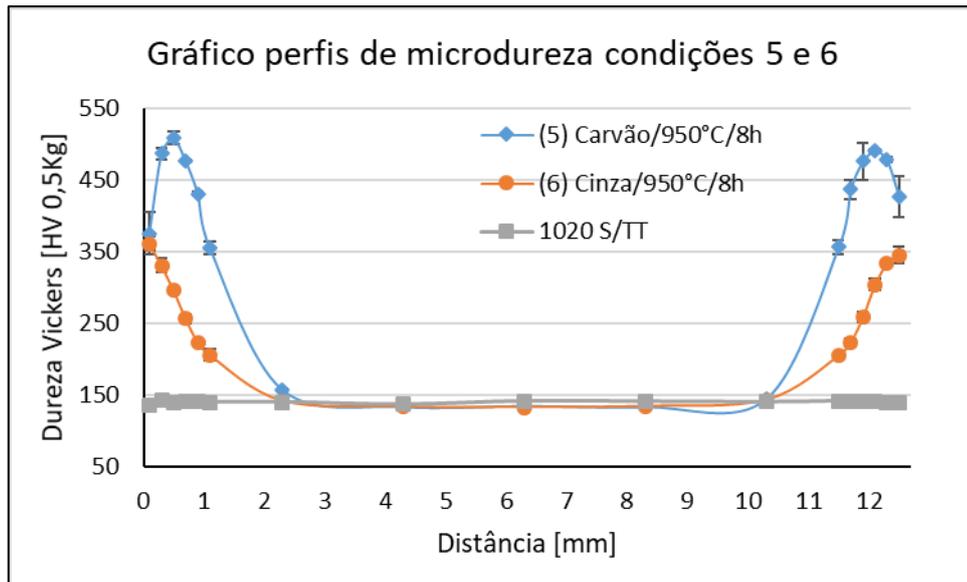
Tabela 9 - Resultados microdureza condições 5 e 6

Endentação	Distância [mm]	Condição 5		Condição 6		Aço 1020	
		Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.
1	0,1	375,5	29,137	361,07	10,126	135,8	2,16
2	0,3	486,3	7,8503	330,37	10,036	142,33	1,51
3	0,5	508,33	9,2283	295,53	3,0291	139,86	1,94
4	0,7	476,57	1,5521	256,27	5,6888	141,1	2,49
5	0,9	430,63	3,1584	222,93	3,9474	140,4	0,98
6	1,1	355,57	9,2312	205,33	8,0933	139,86	1,08
7	2,3	157,07	0,8731	141,5	0,8602	140,06	0,97
8	4,3	133,3	2,1119	133,53	3,0225	136,73	2,17
9	6,3	134,63	0,6944	132,83	0,3091	141,5	4,97
10	8,3	133,03	0,2494	134,23	2,4143	140,93	6,66
11	10,3	144,27	2,5368	142,9	4,5986	140,23	5,13
12	11,5	356,67	9,7356	204,93	0,8219	141,43	5,49
13	11,7	436,87	13,378	223,6	5,2428	141	6,42
14	11,9	475,67	26,005	258,83	7,3667	141,36	2,17
15	12,1	490,37	2,3041	303,83	7,7809	140,66	2,34
16	12,3	477,67	3,3589	333,73	3,1836	139,16	2,69
17	12,5	426,7	28,037	344,9	12,022	138,96	1,47

Fonte: Próprio autor, 2018.

Os gráficos com os valores de dureza encontradas nas condições 5 e 6 e no aço 1020 estão ilustrados na Figura 33.

Figura 33 - Perfis de microdureza condições 5 e 6



Fonte: Próprio autor, 2018.

É observado um aumento de dureza na superfície do material para as duas condições. Os melhores resultados foram encontrados na condição 5, onde o maior valor obtido foi de $508,33 \pm 9,22$ HV (indentação 3) e $490,37 \pm 2,3$ HV (endentação 15). Na condição 6, os maiores valores encontrados foram de $361,07 \pm 10,12$ HV (endentação 1) e $344,9 \pm 12,02$ HV (indentação 17).

A Tabela 10 apresenta os resultados médios de microdureza e o desvio padrão para o aço 1020 sem tratamento térmico e para as condições 7 e 8, utilizando como meio cementante carvão e cinza da casca de arroz, respectivamente, à 950°C durante 15 horas, seguidos de têmpera e revenimento.

Tabela 10 - Resultados microdureza condições 7 e 8

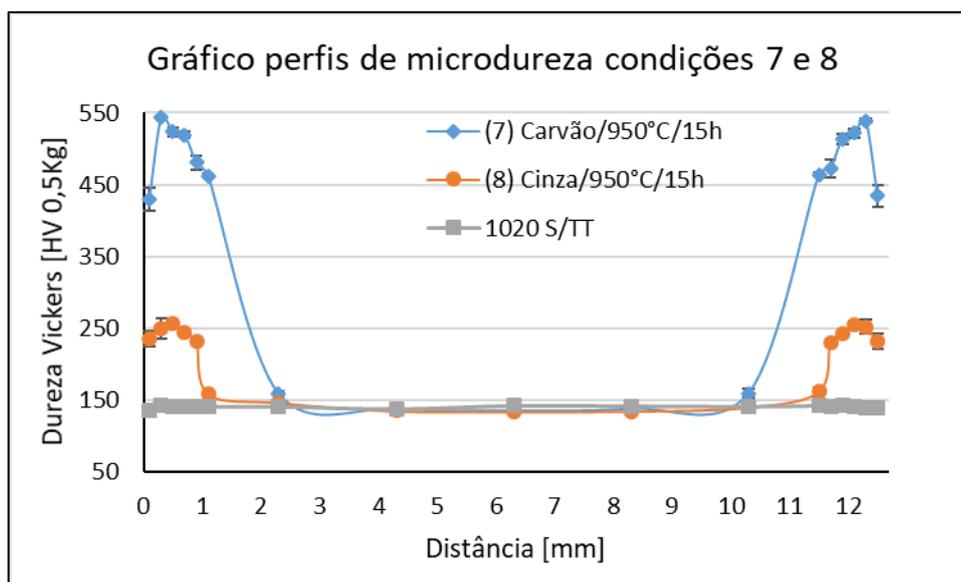
Endentação	Distância [mm]	Condição 7		Condição 8		Aço 1020	
		Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.	Média [HV]	Desv. Pad.
1	0,1	429,6	16,34	234,57	10,684	135,8	2,16
2	0,3	542,8	2,2554	249,33	13,886	142,33	1,51
3	0,5	523,93	6,1916	255,97	1,8803	139,86	1,94
4	0,7	519,27	4,8883	243,27	3,1899	141,1	2,49
5	0,9	480,47	9,1467	231,6	1,7205	140,4	0,98
6	1,1	461,93	2,6712	158,13	3,8681	139,86	1,08
7	2,3	254,03	5,3916	146,03	5,1051	140,06	0,97

8	4,3	136,97	0,4922	134,3	1,0231	136,73	2,17
9	6,3	134,63	1,3425	133,6	1,1518	141,5	4,97
10	8,3	137,17	1,2257	133,9	0,7483	140,93	6,66
11	10,3	228,77	3,217	139,6	2,6546	140,23	5,13
12	11,5	463,67	2,8964	161,47	6,6138	141,43	5,49
13	11,7	473,03	12,422	229,57	4,3223	141	6,42
14	11,9	513,83	7,3713	242,07	1,7442	141,36	2,17
15	12,1	521,73	5,8523	254,5	3,2894	140,66	2,34
16	12,3	538,87	3,0214	251,53	10,218	139,16	2,69
17	12,5	434,23	15,479	231,23	10,576	138,96	1,47

Fonte: Próprio autor, 2018.

Na Figura 34 estão ilustrados os gráficos de perfis de microdureza encontrados nas condições 7 e 8 e no aço 1020.

Figura 34 - Perfis de microdureza condições 7 e 8

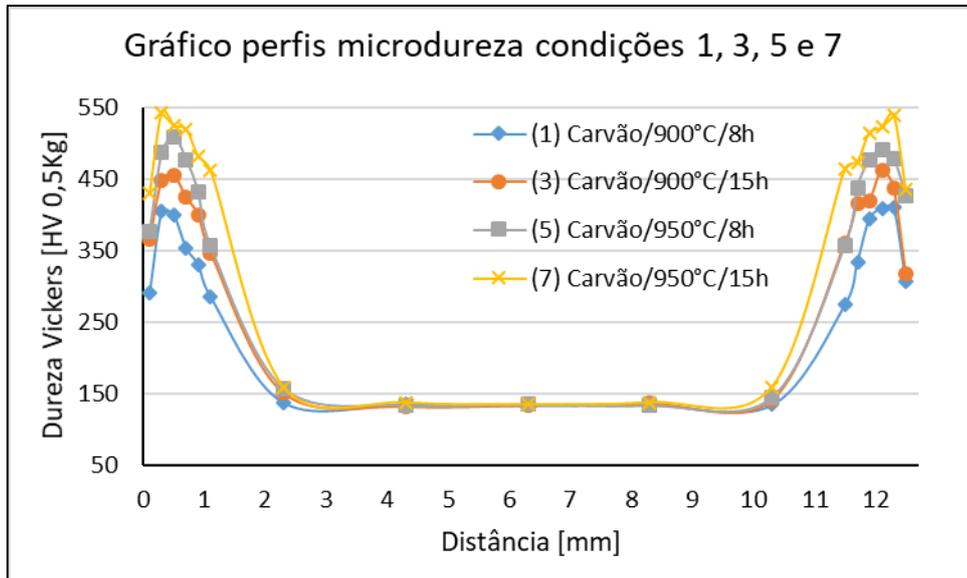


Fonte: Próprio autor, 2018.

Observa-se uma maior dureza na superfície do corpo de prova, tendo um melhor desempenho a condição 7, onde os maiores valores encontrados foram de $542,8 \pm 2,25$ HV (indentação 2) e $538,87 \pm 3,02$ HV (indentação 16). Para a condição 8, os maiores valores de dureza encontrados foram de $255,97 \pm 1,88$ HV (indentação 3) e $254,5 \pm 3,28$ HV (indentação 15).

Na Figura 35 estão ilustrados os gráficos para as 4 condições que receberam cementação com carvão (1, 3, 5 e 7), possibilitando uma melhor comparação entre os resultados.

Figura 35 - Perfis de microdureza condições 1, 3, 5 e 7

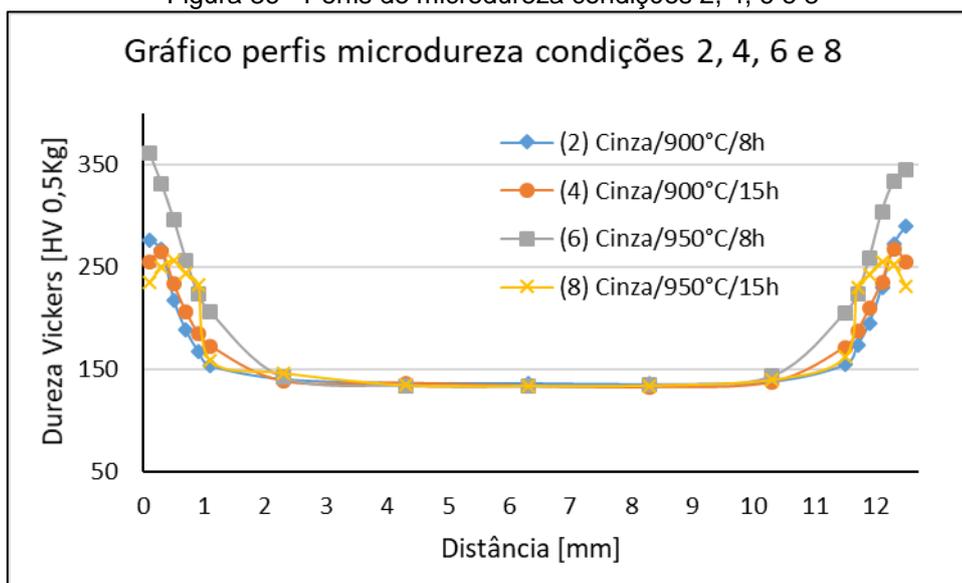


Fonte: Próprio autor, 2018.

Nota-se que os melhores resultados foram obtidos nas condições 5 e 7, onde a cementação ocorreu à 950°C, com tempos de 8 e 15 horas, respectivamente. A condição de cementação com carvão seguida de têmpera e revenido que apresentou os melhores resultados de dureza foi a 7, após 15 horas de cementação.

Na Figura 36 estão ilustrados os gráficos para as 4 condições que receberam cementação com cinza da casca de arroz (2, 4, 6 e 8), favorecendo a comparação entre os resultados.

Figura 36 - Perfis de microdureza condições 2, 4, 6 e 8



Fonte: Próprio autor, 2018.

Observa-se que os melhores resultados para a cementação com cinza de casca de arroz seguida de têmpera e revenimento foram obtidos na condição 6, onde a cementação ocorreu à 950°C, com tempo de 8 horas.

4.4 Ensaio de Desgaste

O desempenho quanto ao desgaste superficial foi avaliado após a têmpera e o revenimento, através da comparação das 8 condições de tratamento térmico descritos na Tabela 3, e de amostras do aço SAE 1020 sem tratamento térmico. Para a realização dos ensaios foram utilizadas três amostras de cada uma das condições citadas.

A Tabela 11 apresenta os resultados médios de perda de massa em percentual e em peso, encontrados nos ensaios de desgaste.

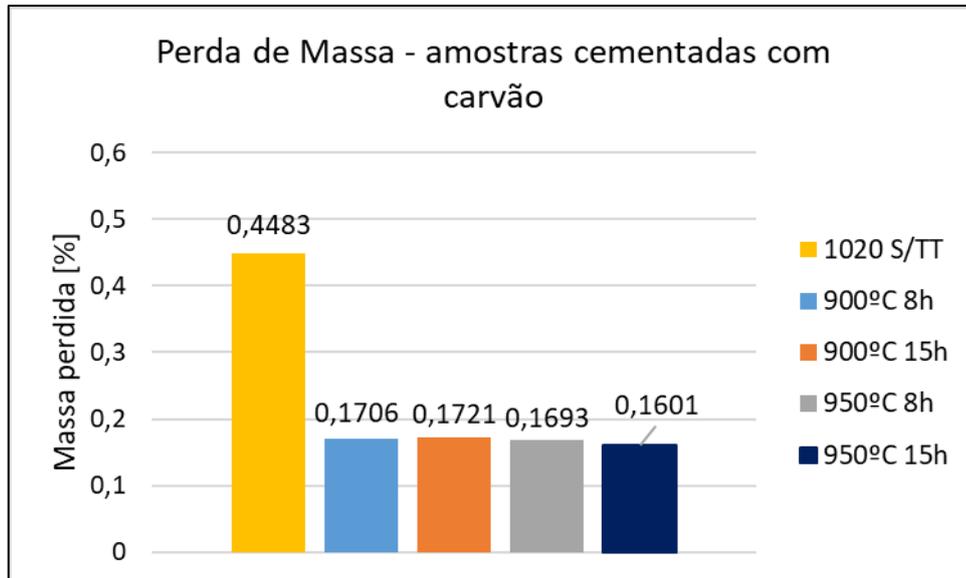
Tabela 11 - Resultados Médios Ensaio de Desgaste

		Resultados Médios Perda de Massa				
		1020 S/TT	900°C 8h	900°C 15h	950°C 8h	950°C 15h
Carvão	%	0,4483	0,1706	0,1721	0,1693	0,1601
	g	0,0536	0,0184	0,0178	0,019	0,0167
Cinza	%	0,4483	0,3785	0,4141	0,144	0,1871
	g	0,0536	0,042	0,0426	0,0157	0,0205

Fonte: Próprio autor, 2018.

A Figura 37 apresenta um gráfico com os resultados médios de perda de massa percentual em relação à massa inicial para as amostras que receberam cementação com carvão vegetal.

Figura 37 - Gráfico comparativo de perda de massa: cementação carvão



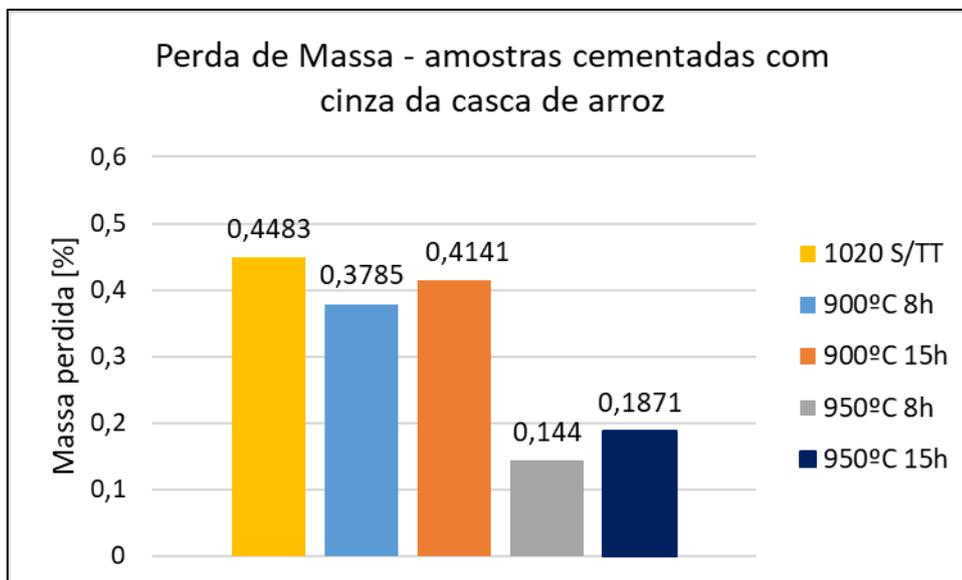
Fonte: Próprio autor, 2018.

Analisando os resultados apresentados no gráfico, nota-se que o aço SAE 1020 apresenta uma resistência ao desgaste muito baixa, perdendo 0,4483% de sua massa durante os testes. Já nas amostras que receberam cementação com carvão, nota-se melhora significativa dos resultados, e uma semelhança entre as 4 condições. Os melhores resultados são observados nas condições onde a cementação foi realizada à 950°C, durante 8 e 15 horas, onde perderam 0,1693% e 0,1601% de massa, respectivamente. Com isso, pode-se concluir que:

- Aço SAE 1020 cementado com carvão vegetal à 950°C durante 8 horas, após têmpera e revenimento apresenta uma melhora de 62,23% de resistência ao desgaste em relação ao aço SAE 1020 sem nenhum tratamento térmico.
- Aço SAE 1020 cementado com carvão vegetal à 950°C durante 15 horas, após têmpera e revenimento apresenta uma melhora de 64,28% de resistência ao desgaste em relação ao aço SAE 1020 sem nenhum tratamento térmico.

Na Figura 38 é apresentado um gráfico com os resultados médios de perda de massa percentual em relação à sua massa inicial para as amostras que receberam cementação com cinza da casca de arroz.

Figura 38 - Gráfico comparativo de perda de massa: cementação cinza



Fonte: Próprio autor, 2018.

Nas amostras que receberam cementação com cinza da casca de arroz há melhoria dos resultados, em relação ao aço SAE 1020 sem tratamento térmico. Os resultados são mais satisfatórios nas condições onde a cementação foi realizada à 950°C, durante 8 e 15 horas, onde perderam 0,144% e 0,1871% de massa, respectivamente. Com isso, pode-se concluir que:

- Aço SAE 1020 cementado com cinza da casca de arroz à 950°C por 8 horas, após têmpera e revenimento apresenta uma melhora de 67,87% de resistência ao desgaste em relação ao aço SAE 1020 sem nenhum tratamento térmico.
- Aço SAE 1020 cementado com cinza da casca de arroz à 950°C por 15 horas, após têmpera e revenimento apresenta uma melhora de 58,26% de resistência ao desgaste em relação ao aço SAE 1020 sem nenhum tratamento térmico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a apresentação dos resultados, no capítulo anterior, podemos obter algumas conclusões sobre a aplicação de tratamento termoquímico de cementação com carvão vegetal e cinza de casca de arroz, seguido de tratamento térmico de têmpera e revenimento em aço SAE 1020. Portanto, analisando os parâmetros dos processos, as seguintes observações são feitas:

- As imagens metalográficas capturadas através do microscópio óptico (MO), após os tratamentos térmicos e termoquímicos, contribuíram para a verificação da microestrutura obtida após os procedimentos empregados. A martensita de baixo carbono encontrada na microestrutura das amostras é um forte indicador de que as fontes de carbono utilizadas na cementação (carvão vegetal e cinza da casca de arroz) apresentam baixo teor de carbono, pois, se a adição de carbono na peça tivesse sido maior, a microestrutura resultante seria a martensita. As microestruturas encontradas resultaram em melhores propriedades mecânicas nas peças, sendo elas micro dureza e resistência ao desgaste superficial.
- Após análise dos dados obtidos experimentalmente e dos gráficos gerados para os perfis de microdureza das 8 condições de tratamento comparadas, é possível observar uma grande diferença na dureza superficial das amostras. Os resultados foram superiores para as amostras que receberam cementação com carvão vegetal. Para as amostras que receberam cementação com cinza da casca de arroz, a condição 6 (950°C 8h) obteve os melhores resultados, tendo uma dureza superficial média de 361,07 HV enquanto a dureza média do aço 1020 sem tratamento térmico é 135 HV. Já nas amostras que receberam cementação com carvão vegetal, a condição 7 (950°C 15h) apresentou os melhores resultados, elevando a dureza média da superfície do aço 1020 para 542 HV.
- No geral os resultados obtidos com o ensaio de desgaste foram satisfatórios e apresentaram uma melhoria significativa de resistência ao desgaste quando comparados ao aço SAE 1020 sem tratamento térmico. Os melhores resultados são observados na cementação realizada à 950°C durante 8 horas, onde o material com cementação utilizando carvão vegetal obteve uma melhora de

62,23%, e o material com cementação utilizando cinza da casca de arroz obteve uma melhora de 67,87%, na resistência ao desgaste.

- Este resultado de resistência ao desgaste encontrado na condição 6 (cinza da casca de arroz 950°C 8h) não pode ser afirmado como confiável, uma vez que os resultados de microdureza não apresentaram uma melhora tão significativa nesta mesma condição. A falta de confiabilidade se dá devido ao equipamento utilizado na realização dos ensaios, uma vez que, este não segue nenhuma norma de regulamentação dos ensaios e possui muitas variáveis durante a sua execução. Uma proposta para corrigir esta situação será exposta nas sugestões para trabalhos futuros.
- Os resultados obtidos com os ensaios de desgaste nas condições de cementação com cinza de casca de arroz à 900°C durante 8 e 15 horas não apresentaram resultados significativos na resistência ao desgaste. Isso pode ser ocasionado devido ao baixo teor de carbono presente na cinza de casca de arroz, onde esta não é capaz de reagir suficientemente com o oxigênio e o dióxido de carbono à 900°C, resultando em má formação de monóxido de carbono, que é o principal agente supridor de carbono para a cementação no aço.
- De maneira geral, a cinza de casca de arroz pode ser utilizada como fonte de carbono para o tratamento termoquímico de cementação sólida, apenas para componentes mecânicos onde se deseja pequena espessura de camada cementada, e dureza superficial média em torno de 360 HV.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Caracterização detalhada dos elementos químicos presentes na cinza de casca de arroz e do carvão vegetal, através de ensaios DRX (Difração de Raios X) e FRX (Fluorescência de Raios X).
- Realizar ensaio de desgaste superficial com equipamento adequado, que possua regulamentação com normas para a sua execução. Um exemplo é o ensaio denominado “Pino sobre disco”, que é realizado de acordo com a norma ASTM G99 que estabelece o procedimento padrão para os testes. Outra possibilidade é realizar o ensaio em equipamento que tenha padronização do

procedimento através da norma ASTM G 65-91, onde o ensaio é realizado com uma roda de borracha e areia seca.

- Realizar novos tratamentos termoquímicos de cementação à 950°C, porém, com outras variações do tempo de cementação, a fim de comparar com os resultados aqui encontrados e obter um tempo ideal para este procedimento.
- Buscar outros ativadores para o tratamento termoquímico de cementação, como por exemplo carbonato de cálcio, carbonato de bário ou carbonato de potássio; objetivando potencializar a formação de monóxido de carbono durante a cementação.
- Utilizar outros materiais para avaliar o tratamento termoquímico de cementação, como por exemplo o aço SAE 8620, que é muito utilizado para cementação por possuir elementos de liga como o níquel, cromo, molibdênio e manganês. A adição destes elementos confere temperabilidade suficiente para se obter uma dureza elevada ao realizar a têmpera após a cementação.

6 REFERÊNCIAS

- [1] ALI, F. H.; ADNAN, A.; CHOY, C. K. **Geotechnical Properties of a Chemically Stabilized Soil from Malaysia Witch Rice Husk Ash as an Additive**. Geotechnical and Geological Engineering. 10 v, n. 2, p. 117 – 134, Amsterdam, 1992.
- [2] ASM Committee on Gas Carburizing. **Carburizing and Carbonitriding**. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, EUA, 1977.
- [3] BAUMGARTEN, J. F. **Cementação Sólida Empregando Granulados Elaborados a partir de Carvão Vegetal Reciclado e Ativador de CaCO_3 Ecologicamente Correto**. Dissertação de Mestrado, UDESC, Joinville – SC, Brasil, 2003.
- [4] CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [5] CHANDRASEKHAR, S.; SATYANARAYANA, K. G.; PRAMADA, P. N. **Processing properties and applications of reactive silica from rice husk – an overview**. In: Journal of Materials Science. 38 v. p. 3159 – 3168, 2003.
- [6] CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2008.
- [7] CHIAVERINI, V. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. São Paulo: AMB, 2008.
- [8] COLPAERT, H.; SILVA, A. L. C. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 2008.
- [9] CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2006.
- [10] EBERT, L. J. **The Role of Residual Stress in the Mechanical Performance of Carburized Steel**. Metallurgical Transactions A, vol. 9, p. 1527-1551, 1978.
- [11] FANTINELI, D. G., **Influência do Tratamento Criogênico nas Propriedades Mecânicas e Tribológicas do Aço ABNT M2**. Dissertação de mestrado em Engenharia. Área de concentração: Tecnologia de Materiais, Universidade Federal do Pampa, 2015.
- [12] FOPPA, C. **Estudo da Influência de diferentes estados superficiais na resistência ao torque e vida de acoplamentos mecânicos fabricados com aços DIN 16MnCr5 e SAE 10B22M**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [13] FOREMAN, R. W. **Pack Carburizing of Steels**. ASM Metals Handbook Vol. 4 – Heat Treating, p.749-753. 1991.

- [14] GERDAU. **Aços para Construção Mecânica – 1020**. Disponível em <<https://www.gerdau.com/pt/productservices/products/Document%20Gallery/Gerdau%20-%201020.pdf>> Acessado em 20/09/2018.
- [15] GHERKE, G. A.. **Revestimento de Roscas Helicoidais Agrícolas a Base de CrC Depositado Via HVOF Posteriormente Irradiadas Com Laser de Nd YAGE De CO2**. 2017. 65F. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.
- [16] GIORDANI, T. **Avaliação Metalúrgica e Mecânica de Aços Cementados e Temperados de Forma Convencional e Intensiva**. Dissertação de Mestrado em Engenharia – UFRGS. Porto Alegre, RS, 2012.
- [17] HOLTZ, O. A. **Noções de Tratamentos Térmicos**. Porto Alegre: Sagra, p. 119, 1992.
- [18] KRAUSS, G. **Steels: Heat Treatment and Processing Principles**. ASM International, Materials Park, Ohio, EUA, 1990.
- [19] LAMPMAN, S. **Introduction to Surface Hardening of Steels**. ASM Handbook Heat Treating, v. 4, ASM International, 1991, p.607-625.
- [20] LANA, S. D. **Proposta para Implantação de um Tratamento Térmico Gasoso: Cementação, Têmpera e Revenido**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Materiais – UFSC. Florianópolis, SC, 2010.
- [21] MOTA, W. T. et al. **Cementação a plasma em baixa temperatura de um aço inoxidável austenítico AISI 304**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Cuiabá, MT, Brasil, 2014.
- [22] NBR NM 87. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica**. Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- [23] RONZANI, A. G. **Resistência à Cavitação do Revestimento de Carbetto de Tungstênio Refundido via Laser de CO2 Aplicado em Aço AISI 1020**. 2017. 121f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.
- [24] SANTOS, G. P. et al. **Cementação Sólida no Aço SAE 8620**. XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE. Ijuí, RS, 2017.
- [25] SILVA, A. L. C. E; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. Edgard Blücher, São Paulo - SP, 2010.
- [26] SIMÕES, S. C. **Ajuste do Processo de Cementação Gasosa Seguido de Têmpera e Revenido para o Controle da Variação Dimensional de Anéis de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Materiais – UFSC. Florianópolis, SC, 2007.
- [27] STROHAECKER, T. R.; FRAINER, V.J.; TIER, M. D. **Princípios de Tratamentos Térmicos em Aços e Ferros Fundidos**, 2013.

[28] TASHIMA, M. M. **Cinza de Casca de Arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. UNESP, Ilha Solteira, SP, 2006.