

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Arthur Werneck Ferreira**

**AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO TEÓRICA PARA O CÁLCULO DA  
ESPESSURA DA CAMADA CEMENTADA NO TRATAMENTO  
TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO SÓLIDA DO AÇO.**

Juiz de Fora

2020

Arthur Werneck Ferreira

**AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO TEÓRICA PARA O CÁLCULO DA  
ESPESSURA DA CAMADA CEMENTADA NO TRATAMENTO  
TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO SÓLIDA DO AÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcominni

Juiz de Fora

2020

Arthur Werneck Ferreira

**AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO TEÓRICA PARA O O CÁLCULO DA  
ESPESSURA DA CAMADA CEMENTADA NO TRATAMENTO  
TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO SÓLIDA DO AÇO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em 24 de Novembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcominni - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Profa. Dra. Yipsy Roque Benito  
Universidade Federal de Juiz de Fora

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Werneck Ferreira, Arthur.

AVALIAÇÃO DA EQUAÇÃO TEÓRICA PARA O O CÁLCULO DA ESPESSURA DA CAMADA CEMENTADA NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTAÇÃO SÓLIDA DO AÇO. / Arthur Werneck Ferreira. -- 2020.  
44 f.

Orientador: Raphael Fortes Marcominni Fortes Marcominni  
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2020.

1. Tratamento Termoquímico. 2. Cementação Sólida. 3. Camada Cementada. I. Fortes Marcominni, Raphael Fortes Marcominni, orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me capacitou e me deu forças para superar todos os obstáculos e dificuldades para chegar até este momento. Sem Ele nada teria sido possível.

À minha mãe, Valeria Werneck e a meu pai Fernando Ferreira por todo o apoio de sempre. E por terem me educado de modo a ter discernimento suficiente para sempre escolher o caminho do bem, da honestidade e da ética.

Aos meus amigos da minha cidade natal Três Rios que estiveram presentes para escutar meus desabafos e me apoiar durante todo esse período. Por todas as boas conversas, festas, incentivos, e momentos compartilhados.

Aos meus amigos da faculdade de engenharia que passaram comigo todos os perrengues, alegrias, emoções, apertos, frustrações, angústias, vitórias e derrotas ao longo desta caminhada.

Aos meus professores da Faculdade de Engenharia, grandes mestres que me passaram conhecimentos técnicos e além disso serviram como exemplo para moldar o meu caráter como cidadão.

Por fim, agradecer a Universidade Federal de Juiz de Fora, que abriu as portas do conhecimento e do mundo para mim.

Meu muito obrigado !

"Há apenas uma maneira de evitar críticas: não falar, não fazer e não ser nada".  
(Aristóteles)

## RESUMO

Os tratamentos termoquímicos de materiais, são procedimentos que visam, através da modificação parcial da composição química de um determinado material, obter ou alterar determinadas características mecânicas do mesmo. No presente trabalho foi realizada uma análise de trabalhos e artigos publicados em que foi realizado o processo termoquímico de cementação sólida. Com os resultados obtidos por esses trabalhos, foi realizada uma coleta comparando os resultados experimentais obtidos e os resultados teóricos que seriam obtidos para a espessura da camada cementada, utilizando-se equação matemática que a literatura considera para estimar esta a camada cementada. Observou-se que, em geral, na comparação entre o que foi estipulado teoricamente por meio de equação matemática e o que foi obtido através dos experimentos de cementação, foram encontrados valores muito divergentes. A camada cementada experimental apresentou maior profundidade que a camada cementada teórica. O presente trabalho determinou um fator de correção médio para a equação que permite estimar a camada cementada teórica. Por fim, conclui-se que o processo de cementação sólida é indicado para casos em que não se necessita de um controle muito rigoroso para a espessura da camada cementada.

Palavras-chave: Tratamento termoquímico, Cementação Sólida, Camada Cementada, Segunda Lei de Fick, Fator de correção.

## ABSTRACT

Thermochemical treatments of materials are procedures that aim, by partially modifying the chemical composition of a given material, to obtain or change certain mechanical characteristics of the same. In the present work, an analysis of published works and articles was carried out in which the thermochemical process of solid cementation was carried out. With the results obtained by these works, a collection was made comparing the experimental results obtained and the theoretical results that would be obtained for the thickness of the cemented layer, using a mathematical equation that the literature considers to estimate this the cemented layer. that, in general, in the comparison between what was theoretically stipulated by means of mathematical equation and what was found through the cementation experiments, very divergent values were found. The experimental cemented layer showed greater depth than the theoretical cemented layer. The present work determined an average correction factor for the equation that allows estimating a theoretical cemented layer. Finally, the solid cementation process has been concluded and is indicated for cases in which it is not necessary to have a very strict control for the thickness of the cemented layer.

Key-words: Thermochemical treatment, solid cementation, mechanical properties

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo Engrenagens . . . . .	14
Figura 2 – Influência do tempo e da temperatura de cementação em relação a profundidade de carbono na superfície. . . . .	16
Figura 3 – Esquema cementação sólida . . . . .	17
Figura 4 – Célula Unitária Tetragonal de Corpo Centrado . . . . .	18
Figura 5 – Relação entre dureza, quantidade de carbono e quantidade de martensita. . . . .	18
Figura 6 – Micrografia eletrônica da martensita revenida . . . . .	19
Figura 7 – Ciclo de um processo de cementação genérico, incluindo têmpera e revenimento . . . . .	20
Figura 8 – Perfis de concentração para um processo de difusão em regime não-estacionário tomados em três tempos diferentes . . . . .	22
Figura 9 – Variação do coeficiente de difusão. . . . .	23
Figura 10 – Gráfico comparativo entre os valores experimentais e teóricos de camada cementada no trabalho de Garcia (2015) . . . . .	26
Figura 11 – Gráfico comparativo entre os valores projetados e teóricos de camada cementada no trabalho de Muniz et al (2017) . . . . .	28
Figura 12 – Gráfico de dispersão contendo os valores encontrados para a camada cementada teórica e experimental . . . . .	30
Figura 13 – Imagem ilustrativa de um forno mufla) . . . . .	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores Experimentais e Teóricos . . . . .	25
Tabela 2 – Valores Experimentais e Teóricos . . . . .	26
Tabela 3 – Valores Experimentais e Teóricos . . . . .	27
Tabela 4 – Valores Teóricos Máximos e Mínimos para Espessura de Camada Cementada . . . . .	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute-EUA
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
SAE	Society of Automotive Engineers
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado

## LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ} C$	graus Celsius
$C$	Concentração para a cementação
$t$	Tempo
$x$	Espessura da camada cementada
$D$	Coeficiente de difusão
$kg$	Quilograma
$m$	Metro
$mm$	Millimetro
$J$	Joule
$K$	Kelvin

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1	Considerações iniciais . . . . .	13
1.2	Objetivos . . . . .	14
1.2.1	Objetivo Geral . . . . .	14
1.2.2	Objetivos Específicos . . . . .	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1	O aço . . . . .	15
2.2	Tratamentos Termoquímicos de Cementação . . . . .	15
2.3	Cementação Sólida ( ou em caixa) . . . . .	16
2.4	Vantagens e Desvantagens da Cementação Sólida . . . . .	20
2.5	O processo de difusão . . . . .	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>33</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	33
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>34</b>
	<b>APÊNDICE A – PRIMEIRO . . . . .</b>	<b>37</b>
	<b>APÊNDICE B – SEGUNDO . . . . .</b>	<b>39</b>
	<b>APÊNDICE C – TERCEIRO . . . . .</b>	<b>40</b>
	<b>APÊNDICE D – QUARTO . . . . .</b>	<b>41</b>
	<b>APÊNDICE E – QUINTO . . . . .</b>	<b>42</b>
	<b>APÊNDICE F – SEXTO . . . . .</b>	<b>43</b>
	<b>APÊNDICE G – SÉTIMO . . . . .</b>	<b>44</b>
	<b>ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE . . . . .</b>	<b>45</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Em situações práticas na vida de um engenheiro, por diversas ocasiões faz-se necessário adaptar ou modificar propriedades mecânicas de um material com o objetivo de que o mesmo sirva para uma determinada aplicação específica. Nesse contexto, os tratamentos termoquímicos são uma das maneiras utilizadas afim de adequar o material às características necessárias para a sua respectiva aplicação.

"Tratamentos termoquímicos são assim chamados porque são realizados em condições ambientes que promovem uma modificação parcial da composição química do material. Essa modificação é superficial e o tratamento é aplicado nos aços, tendo como objetivo fundamental aumentar a dureza e resistência ao desgaste da superfície, até uma certa profundidade, ao mesmo tempo em que o núcleo da peça cuja composição química não é afetada se mantém tenaz"(CHIAVERINI, 1986, p.247).

Dentre os principais tratamentos termoquímicos, existem: cementação (podendo ser sólida, líquida ou gasosa), nitretação, cianetação e carbonitretação

O presente trabalho dedica-se a estudar os efeitos termoquímicos da cementação sólida. Pretende-se avaliar e comparar a espessura da camada cementada obtida experimentalmente por trabalhos anteriores, com a espessura que seria obtida teoricamente através de equação matemática. Chiaverini (1986, p. 247), define a cementação sólida como sendo o processo em que : "consiste no enriquecimento superficial de carbono processo que tem por objetivo aumentar a dureza superficial de um aço de baixo teor de carbono, através da introdução de carbono em sua superfície externa. Com isso o objetivo é criar uma camada externa com maior dureza e resistência e mantendo o núcleo da peça dúctil".

Um exemplo de aplicação da cementação, ocorre na indústria na produção de engrenagens (figura 1). Como esse tipo de peça está em constante contato e atrito com outras peças e, até mesmo com ela mesma, necessita-se que a sua superfície externa seja dura e resistente, a fim de que se mantenha uma vida útil mais longa possível.



Figura 1 – Exemplo Engrenagens

Fonte: Autor

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho fazer a comparação entre espessura da camada cementada, obtida experimentalmente por trabalhos anteriores, e a espessura da camada cementada utilizando a equação que possibilita a determinação da mesma, para idênticas condições em que o experimento foi realizado. Com isso pretende-se avaliar a validade prática desta equação.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo dos pormenores do processo de cementação sólida.
- Avaliar e comparar as vantagens e desvantagens do processo termoquímico.
- Comparar a espessura da camada cementada obtida experimentalmente, com a espessura da camada cementada obtida teoricamente, para as mesmas condições experimentais.
- Encontrar um fator de correção para a relação matemática utilizada para estimar a camada cementada.
- Discutir e debater os motivos que levam aos valores teóricos e experimentais a serem divergentes.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 O aço

"O aço é uma liga de ferro e carbono contendo de 0,008% a 2% de carbono, além de outros elementos residuais resultantes do processo de fabricação o ferro fundido possui entre 2% e 6,7% de carbono"(CURY e BARBOSA. 2019. p.6). Devido suas características mecânicas como ductilidade, maleabilidade, resistência, os aços possuem ampla utilização na indústria em geral.

Conforme Callister (2007, p.210) "De todas as ligas binárias, possivelmente o mais importante é o formado pelo ferro e o carbono. Tanto os aços quanto os ferro fundidos, que são os principais materiais estruturais em toda cultura tecnologicamente avançada, são essencialmente ligas ferro-carbono."

É indiscutível a importância do aço para o desenvolvimento da sociedade como conhecemos hoje. Dada a vasta aplicação que esse material possui, podendo ser adaptado para diversas funções desde uma estrutura para a construção civil a uma lata de aço para conservar alimentos.

Vale destacar que o aço é um material 100% reciclável. Sua sucata pode ser transformada infinitas vezes em um novo aço sem perda de qualidade.

### 2.2 Tratamentos Termoquímicos de Cementação

"O processo clássico de endurecimento superficial é a cementação, isto é, o enriquecimento superficial de carbono de certos aços, quando aquecidos convenientemente em contato com substâncias carbonáceas"(CHIAVERINI, 2005, p.123).

Ainda segundo Chiaverini (2005, p.123): "A cementação é um tratamento muito antigo pois os romanos já o praticavam, consiste na introdução de carbono na superfície do aço de modo que este, depois de convenientemente temperado e revenido apresente uma superfície muito mais dura. É necessário que o aço, em contato com a substância capaz de fornecer carbono seja aquecido a uma temperatura em que a solução de carbono no ferro seja fácil. Nessas condições, a temperatura deve ser superior a da zona crítica onde o ferro se encontrará na sua forma alotrópica gama. Por outro lado a profundidade de penetração do carbono depende da temperatura e do tempo (figura 2)."

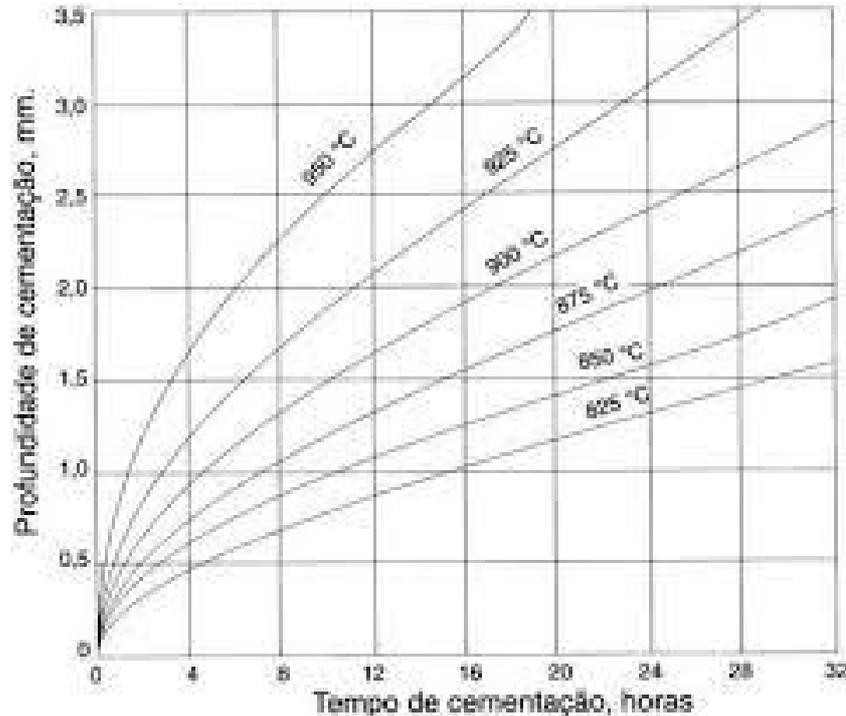


Figura 2 – Influência do tempo e da temperatura de cementação em relação a profundidade de carbono na superfície.

Fonte: Chiaverini, 2008

### 2.3 Cementação Sólida ( ou em caixa)

"Na cementação o elemento fundamental é o carbono, na forma de carvão, monóxido de carbono ou contido em banhos de cianetos"(CHIAVERINI, 2007. p. 109).

Patan (2018) obteve resultados satisfatórios em relação ao ganho de dureza e resistência ao desgaste superficial com o processo de cementação sólida em amostras de aços ABNT 1020, utilizando cinzas de cascas de arroz e carvão vegetal, como fontes de carbono. Gentil e col (2017) obtiveram significativo aumento de dureza no aço no processo e cementação solida , utilizando, como fonte de carbono, biomassa de celulose.

"A superfície do aço fica enriquecida de carbono, até a profundidade que pode ser perfeitamente preestabelecida, permitindo assim a sua têmpera posterior, para o aumento da dureza e resistência ao desgaste"(CHIAVERINI, 2007. p.109). As temperaturas do processo estão na faixa entre 850°C e 900°C, porque nessa faixa o ferro está na forma alotrópica em que absorve e dissolve o carbono. Os processos usuais de cementação podem elevar o teor superficial de carbono até 0,8% a 1,0%.

"A profundidade de cementação depende da temperatura e do tempo à temperatura, pois tanto temperaturas mais elevadas como tempos mais longos facilitam a difusão de carbono para o interior do aço (CHIAVERINI, 2007. p.110)".

Nesse processo coloca-se a peça a ser cementada dentro de uma caixa fechada juntamente com o material rico em carbono. Nesse caso, a caixa (contendo a peça a ser cementada e o material rico em carbono) é levado ao forno, pelo tempo e a temperatura desejadas. A temperatura é elevada de modo que a peça a ser cementada atinja a sua fase austenita (estrutura CFC), que, possui um maior número de intertícios e permite a difusão, de acordo com a segunda Lei de Fick, de carbono da atmosfera cementante para o interior da peça. A figura 3, mostra o esquema de cementação em caixa.

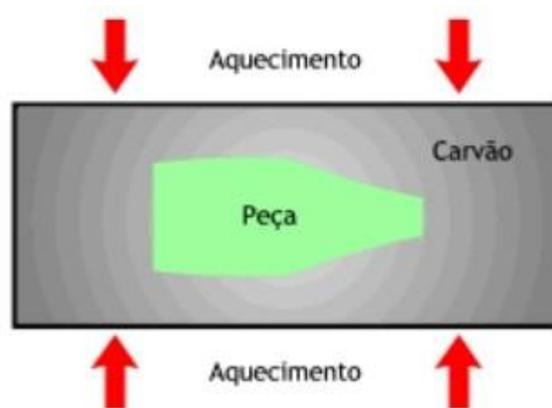


Figura 3 – Esquema cementação sólida

Autor.

A partir daí, no resfriamento, dois fatos podem ocorrer:

- O primeiro é que se o aço for resfriado lentamente, a estrutura se transforma de austenita (CFC) para perlita (CCC). Ou seja, a estrutura possui o tempo necessário para expulsar o carbono que foi absorvido. Forma-se desse jeito a ferrita e a cementita, ou seja, perlita.
- "Se no caso o resfriamento ocorrer de forma rápida (têmpera em água, por exemplo) a estrutura transforma-se de austenita para martensita. Um grande número de átomos apresenta movimentos cooperativos, nos quais existe apenas um ligeiro deslocamento de cada átomo em relação aos seus vizinhos. Isso ocorre de maneira tal que a austenita estrutura CFC apresenta uma transformação polimórfica para uma martensita tetragonal de corpo centrado (TCC) (figura 4). Uma célula unitária dessa estrutura cristalina é simplesmente um cubo de corpo centrado que foi alongado em uma de suas dimensões; essa estrutura é bem diferente daquela ferrita CCC. Todos os átomos de carbono permanecem como impurezas intersticiais na martensita; como tal, eles constituem uma solução sólida supersaturada capaz de se transformar rapidamente em outras estruturas se aquecida até temperaturas onde as taxas de difusão se tornem apreciáveis. Muitos aços, no entanto, retêm quase que indefinidamente a sua

estrutura martensítica à temperatura ambiente"(CALLISTER 2007, p.239).

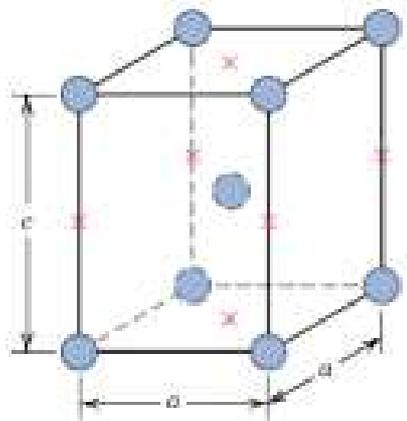


Figura 4 – Célula Unitária Tetragonal de Corpo Centrado  
 . Callister Jr, William D. 2007.

A martensita é dura e resistente, porém apresenta grande fragilidade. Isso porque não possui estrutura cúbica (é tetragonal) e todo o carbono permanece em solução sólida. Quanto maior a porcentagem de carbono, maior será a dureza da martensita (figura 5).

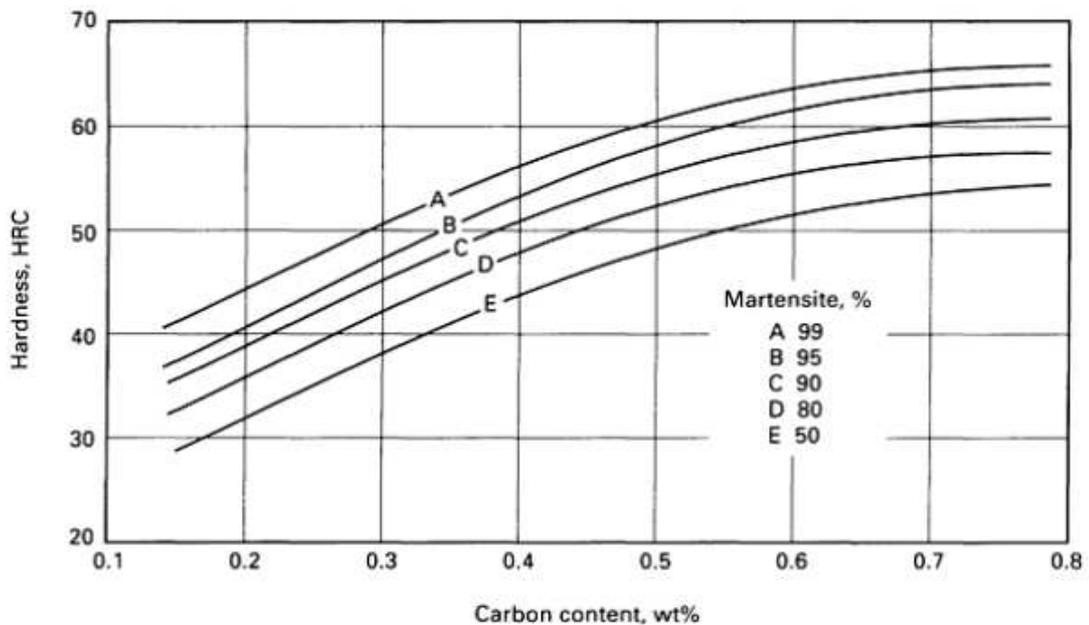


Figura 5 – Relação entre dureza, quantidade de carbono e quantidade de martensita.

. ASM Handbook - Heat Treating

Segundo Callister ( 2007, p.247) "No estado "como temperado", a martensita além de ser muito dura é tão frágil que não pode ser empregada para a maioria das aplicações; além disso, quaisquer tensões internas que possam ter sido introduzidas durante têmpera reduzem a resistência. A ductilidade e a tenacidade da martensita podem ser aprimoradas e essas tensões internas podem ser aliviadas por um tratamento térmico conhecido como revenido ."

"O revenido é obtido pelo aquecimento de um aço martensítico até uma temperatura abaixo da eutetóide por um período de tempo específico. Esse tratamento térmico de revenimento permite, através de processos de difusão, a formação de martensita revenida, de acordo com a reação, onde a martensita TCC monofásica, que se é superfaturada em carbono, se transforma em martensita revenida, composta pelas fases estáveis ferrita e cementita."(CALLISTER 2007, p247).

A microestrutura da martensita revenida consiste em partículas de cementita extremamente pequenas e uniformemente dispersas em uma matriz contínua de ferrita (figura 6). "A martensita revenida pode ser quase tão dura e resistente quanto a mertensita, porém com uma ductilidade e uma tenacidade substancialmente melhorada "(CALLISTER 2007. p.247) .

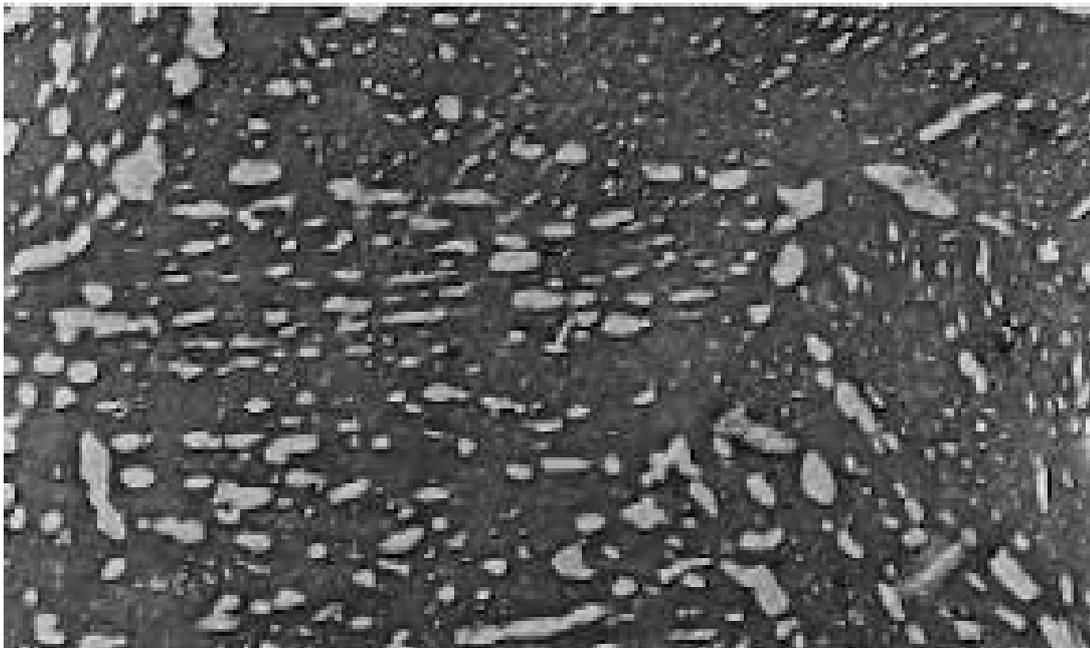


Figura 6 – Micrografia eletrônica da martensita revenida  
. Callister, William D. Jr.2007.

O gráfico representado na figura a seguir (figura 7) representa de forma genérica as etapas do processo.

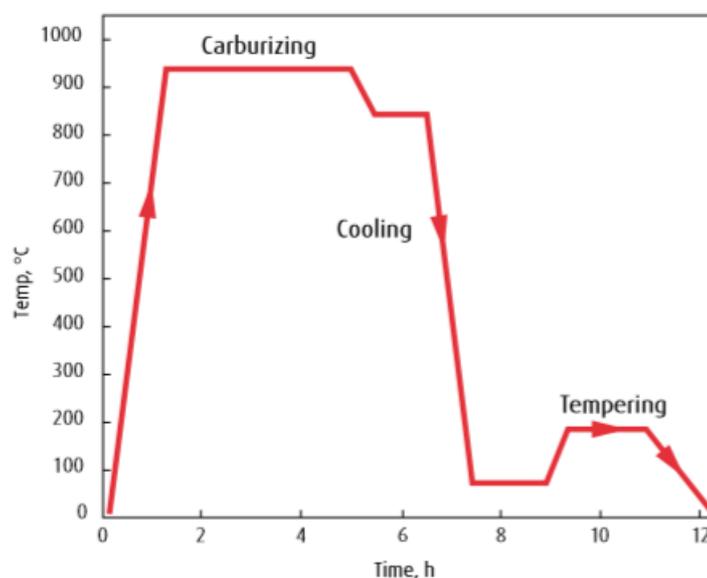


Figura 7 – Ciclo de um processo de cementação genérico, incluindo têmpera e revenimento . Linda Gas - Booklet.

Para a têmpera posterior ao processo de cementação Chiaverini (2007, p.283) recomenda, para peças de pequenas dimensões e com pouco risco de empenamento, a realização da têmpera em água.

Chiaverini (2008, p.109) recomenda para o processo de cementação aços de baixo teor de carbono. De fato, Silva (2013), realizou experimentos de cementação sólida em tarugos de aços ABNT 1020 e 1045. Observou-se que o aço ABNT 1020 apresentou um maior percentual de aumento de dureza superficial do que o aço ABNT 1045.

Schneiders (2017), destaca que, em geral, os aços utilizados para cementação apresentam boa usinabilidade.

#### 2.4 Vantagens e Desvantagens da Cementação Sólida

De acordo com Santos (2017) e Chiverini (2008) as principais vantagens e desvantagens do processo de cementação sólida são:

##### Vantagens

- Pode utilizar uma grande variedade de fornos.
- Exige menor experiência do operador.
- É eficiente econômico para o processamento de pequenos lotes de peças ou peças de grandes dimensões.

### Desvantagens

- Não é recomendada para a produção de camadas cementadas finas, que devem estar dentro de regimes de tolerâncias estreitos.
- Não é tão limpo, quanto outros métodos.
- Não é o melhor método para ter-se o controle da espessura da camada cementada.
- Não é o melhor método para ter-se um controle preciso do carbono superficial e do gradiente de carbono.

Santos (2017) destaca que a cementação sólida possui um baixo custo de execução, no entanto para se conseguir grandes profundidades de camada cementada, necessita-se de um tempo muito grande de aquecimento da peça a ser cementada no forno.

Leitão et al. (2012) fizeram a comparação entre os processos de nitretação e cementação para a produção de engrenagens com aços ABNT 4140 e 8120. Concluiu-se que o processo de cementação apresenta a maior profundidade de camada endurecida e a maior dureza superficial. Em contrapartida, apresentou custos 30% superiores.

"O controle exato da profundidade a ser cementada na cementação sólida é problemático, isto porque existem muitos aspectos que influenciam, como a duração do processo, a quantidade de ar presente no compartimento, o aquecimento do compartimento, o gradiente de carbono a ser controlado entre outros." Abdulrazzag (2016).

## 2.5 O processo de difusão

. A difusão é o fenômeno de transporte de material pelo movimento de átomos. No caso da cementação a difusão, do carbono para o aço, ocorre através das posições intersticiais, isto é, os átomos de carbono difundem para o aço através dos espaços intersticiais existentes. Esse mecanismo é conhecido como "Difusão Intersticial". "A maioria das situações práticas envolvendo a difusão ocorre sob condições de regime não estacionário (condições transientes). Isso quer dizer 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 em que está se difundindo" (CALLISTER, 2007. p.85). Este comportamento está representado de forma genérica no gráfico da figura 8.

Ainda na cementação sólida, a profundidade da camada cementada pode variar de 0,6 a 6,9 mm, dependendo do tempo e temperatura empregados. Essa profundidade é medida por meio da dureza. Costa e Silva Mei [8], explicam que se considera "camada cementada efetiva" a região superficial com dureza maior que 50 HRC e, que existe ainda, a "camada cementada total", que é a região superficial onde houve aumento de teor de carbono. A profundidade cementada depende do tempo de processamento, naturalmente.

Ao comparar o aumento de dureza em tarugos de aço ABNT 1020, Gouveia( 2018), observou que houve aumento gradativo de dureza entre os tarugos que ficaram por mais tempo em aquecimento. Este fato comprova como a difusão do carbono para a peça é dependente do tempo.

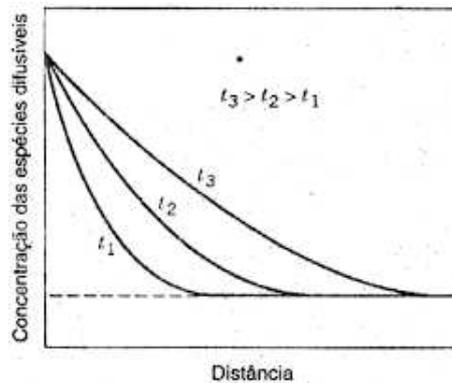


Figura 8 – Perfis de concentração para um processo de difusão em regime não-estacionário tomados em três tempos diferentes

Callister, William D. Jr.2007.

Sob condições de regime transiente, a determinação da concentração em relação a sua profundidade de soluto, obedece a segunda lei de Fick (equação 2.1). Onde  $t$  representa o tempo [s],  $x$  representa profundidade da camada cementada [mm],  $C$  representa a concentração [ $kg/mm^3$ ] e  $D$  representa o coeficiente de difusão [ $m^2/s$ ].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(D \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} \quad (2.1)$$

Esta equação apresenta solução do tipo (equação 2.2). Onde, na equação os  $C$  representam as concentrações de carbono. Assim,  $C_s$  representa a concentração superficial,  $C_0$  a concentração inicial e  $C_x$  representa a concentração na profundidade definida a ser cementada.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right) \quad (2.2)$$

Vale destacar que os valores para o coeficiente de difusão variam de acordo com a temperatura, obedecendo a equação 2.3. Onde  $D$  representa o coeficiente de difusão a ser encontrado quando a peça está submetida a determinada temperatura [ $m^2/s$ ],  $D_0$  representa a constante pré exponencial independente da temperatura [ $m^2/s$ ],  $Q$  representa a energia de ativação para difusão [ $J/mol$ ],  $R$  representa a constante dos gases, e  $T$  representa a temperatura absoluta [ $K$ ].

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (2.3)$$

Resolvendo a equação geral, a partir da consideração de que a superfície em estudo é um sólido semi-infinito, isto é, considera-se que a concentração na superfície permanece constante. Dessa forma pode-se estimar a espessura da camada cementada, através da equação 2.4.

$$x \cong \sqrt{D \cdot t} \quad (2.4)$$

□

Alguns valores típicos para os coeficientes de difusão considerando a espécie em difusão e o metal hospedeiro estão listados na figura a seguir (figura 9).

Diffusing Species	Host Metal	$D_0(m^2/s)$	Activation Energy $Q_a$		Calculated Values	
			$kJ/mol$	$eV/atom$	$T(^{\circ}C)$	$D(m^2/s)$
Fe	$\alpha$ -Fe (BCC)	$2.8 \times 10^{-4}$	251	2.60	500	$3.0 \times 10^{-21}$
					900	$1.8 \times 10^{-15}$
Fe	$\gamma$ -Fe (FCC)	$5.0 \times 10^{-5}$	284	2.94	900	$1.1 \times 10^{-17}$
					1100	$7.8 \times 10^{-16}$
C	$\alpha$ -Fe	$6.2 \times 10^{-7}$	80	0.83	500	$2.4 \times 10^{-12}$
					900	$1.7 \times 10^{-10}$
C	$\gamma$ -Fe	$2.3 \times 10^{-5}$	148	1.53	900	$5.9 \times 10^{-12}$
					1100	$5.3 \times 10^{-11}$
Cu	Cu	$7.8 \times 10^{-5}$	211	2.19	500	$4.2 \times 10^{-19}$
Zn	Cu	$2.4 \times 10^{-5}$	189	1.96	500	$4.0 \times 10^{-18}$
Al	Al	$2.3 \times 10^{-4}$	144	1.49	500	$4.2 \times 10^{-14}$
Cu	Al	$6.5 \times 10^{-5}$	136	1.41	500	$4.1 \times 10^{-14}$
Mg	Al	$1.2 \times 10^{-4}$	131	1.35	500	$1.9 \times 10^{-13}$
Cu	Ni	$2.7 \times 10^{-5}$	256	2.65	500	$1.3 \times 10^{-22}$

Figura 9 – Variação do coeficiente de difusão.

Callister, William D. Jr. 2007.

Apesar de a teoria da difusão de acordo com a segunda Lei de Fick ser amplamente aceita, Garcia (2015), ao realizar o processo de cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320, encontrou valores divergentes entre a teoria e a prática. Ou seja, os valores estimados teoricamente para a dureza de determinado ponto de espessura da camada cementada, não foram confirmados com o que foi medido após a realização do tratamento termoquímico. Um exemplo foi estimada uma camada cementada teoria de 0,4 mm, para um tempo de cementação de 5,450 horas, em um processo que ocorreu a 900 °C. Experimentalmente, no entanto, foi encontrada uma camada de 1,2 mm.

### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho considerou alguns trabalhos de conclusão de curso e artigos publicados . Nesses trabalhos foram realizados o processo de cementação sólida de forma experimental. Dessa forma foram obtidas camadas cementadas de determinadas espessuras para cada situação, em função da temperatura e do intervalo de tempo no qual o processo ocorreu.

A partir dos resultados experimentais obtidos para a espessura de camada cementada, foram calculados para as mesmas condições de trabalhos os valores que deveriam ser encontrados utilizando-se a equação (2.4). A literatura considera esta equação para estimar a profundidade da camada cementada.

Com os resultados obtidos foram comparados e analisados os valores teóricos encontrados através da equação e os valores experimentais, encontrados via a realização do experimento de cementação.

Dessa forma esse trabalho buscou avaliar a possibilidade de se prever a espessura da camada cementada no tratamento termoquímico de cementação sólida.

## 4 DISCUSSÃO

Assim, tomamos por base alguns trabalhos presentes na literatura sobre o tema cementação sólida para realizarmos as comparações e avaliações.

Santos et al (2017) realizou o experimento de cementação sólida em aços do tipo SAE 8620. Para avaliar o tamanho da camada cementada, os autores utilizaram a análise micrográfica, a fim de verificar como a estrutura variou da parte externa até o interior das amostras cementadas.

Foram utilizadas temperaturas e tempos diversos. Desta forma, o processo foi realizado para as seguintes temperaturas e tempos:

- 925°C, tempo de 3 horas (10800 s).
- 900°C, tempo de 4 horas (14400 s).
- 925°C, tempo de 6 horas (21600 s).
- 925°C, tempo de 5 horas (18000 s) .

A tabela 1 mostra a comparação entre os valores encontrados experimentalmente pelos autores e os valores encontrados utilizando as equação teóricas. A memória de cálculo utilizada encontra-se no apêndice A deste trabalho.

Tabela 1 – Valores Experimentais e Teóricos

Temperatura (°C)	Tempo (s)	camada experimental (mm)	camada teórica (mm)
925	10800	0,3	0,296
900	14400	0,6	0,291
925	21600	1,2	0,4181
925	18000	1,0	0,3817

Garcia (2015), realizou o estudo da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos de aço SAE 4320. Assim foi realizado o experimento a temperatura de 900°C. Foram utilizados os seguintes intervalos de tempo:

- 2,378 horas (8560,8 s);
- 5,450 horas ( 19620 s);
- 10,773 horas ( 38782,8 s).

Para as respectivas condições experimentais foram realizados o cálculos para a camada cementada teórica. A memória dos cálculos encontra-se no apêndice B ao fim deste

trabalho. A autora utilizou a análise micrográfica para determinar a camada cementada experimental. Esta análise foi realizada utilizando o microscópio óptico (marca KOZ-004, modelo XJM404).

A tabela 2 mostra os resultados que foram encontrados experimentalmente pela autora do trabalho e os resultados encontrados teoricamente através dos cálculos realizados.

Tabela 2 – Valores Experimentais e Teóricos

Temperatura (°C)	Tempo (s)	camada experimental (mm)	camada teórica (mm)
900	8560,8	0,5	0,22473
900	19620	1,2	0,34023
900	38782,8	2,0	0,47839

No gráfico ilustrado na figura 11, está representado o gráfico comparativo dos valores teóricos e experimentais para o trabalho de Garcia (2015). Observa-se com clareza a diferença entre os valores.

**Gráfico: camada cementada x tempo de cementação**

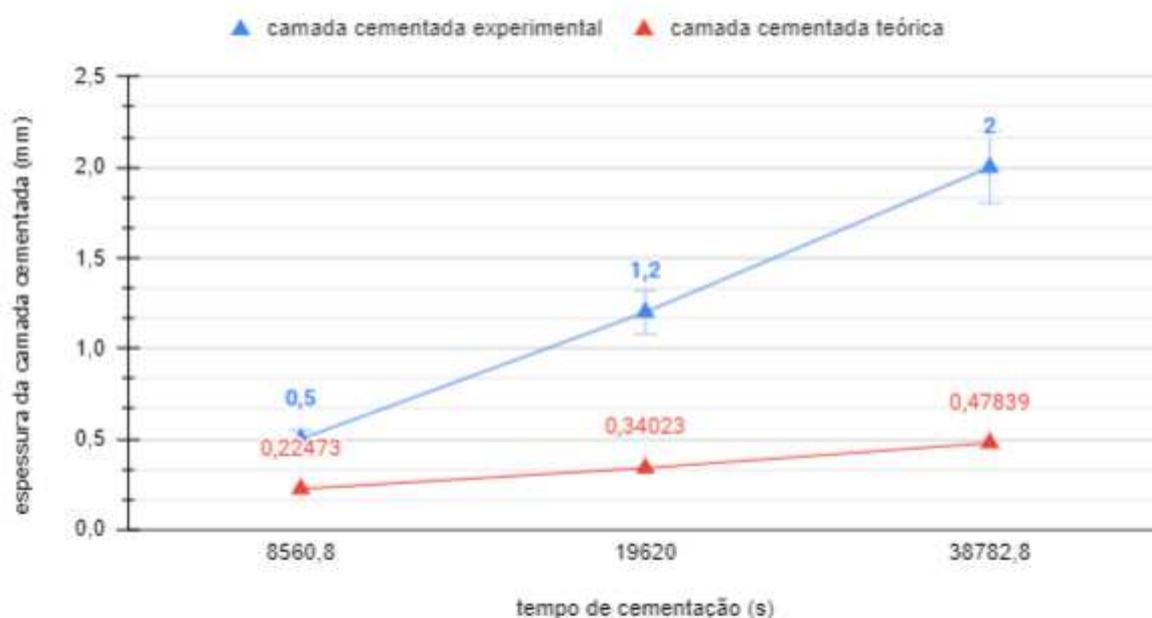


Figura 10 – Gráfico comparativo entre os valores experimentais e teóricos de camada cementada no trabalho de Garcia (2015)

Autor

Em seu trabalho de conclusão de curso, Cardoso (2019), buscou reproduzir o trabalho de Garcia (2015), utilizando o tempo de cementação de 2,4 horas (8640 s). Nas amostras em que realizou o processo, encontrou uma profundidade de camada cementada variando entre 0,40 - 0,60 mm. Essa análise do tamanho da camada cementada foi feita através de análise da micrografia da estrutura, com o uso do microscópio óptico (marca KOZ-004, modelo XJM404).

Realizando o cálculo teórico, obtemos, para as mesmas condições experimentais, uma camada cementada de espessura 0,2257786 mm. A memória de cálculo está registrada no apêndice C, deste trabalho.

Muniz et al (2017) realizou experimento de cementação em aço AISI 5115. Os aços foram cementados a uma temperatura fixada de 900°C, Os intervalos de tempo utilizados para o processo foram:

- 6 horas (21600 s);
- 11 horas (39600 s);
- 24 horas (86400 s).

A tabela 3 mostra a comparação entre os valores experimentais encontrados pelos autores e os valores calculados, por este trabalho. Para a verificação da camada cementada experimental, os autores utilizaram a análise micrográfica da estrutura, realizada com o uso de microscópio óptico Zeiss Axiotech 100 HD do laboratório de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O apêndice D, deste trabalho registra a memória de cálculo utilizando a equação 2.4 , para as mesmas condições experimentais em que os autores realizaram o processo.

Tabela 3 – Valores Experimentais e Teóricos

Temperatura (°C)	Tempo (s)	camada experimental (mm)	camada teórica (mm)
900	21600	1,22407	0,3568873
900	39600	1,6576	0,48336
900	86400,8	2,4454	0,7139

O gráfico abaixo (figura 11), mostra de forma clara a discrepância entre os valores obtidos por Muniz et al (2017), e o que foi calculado teoricamente.

### Gráfico: camada cementada X tempo cementação

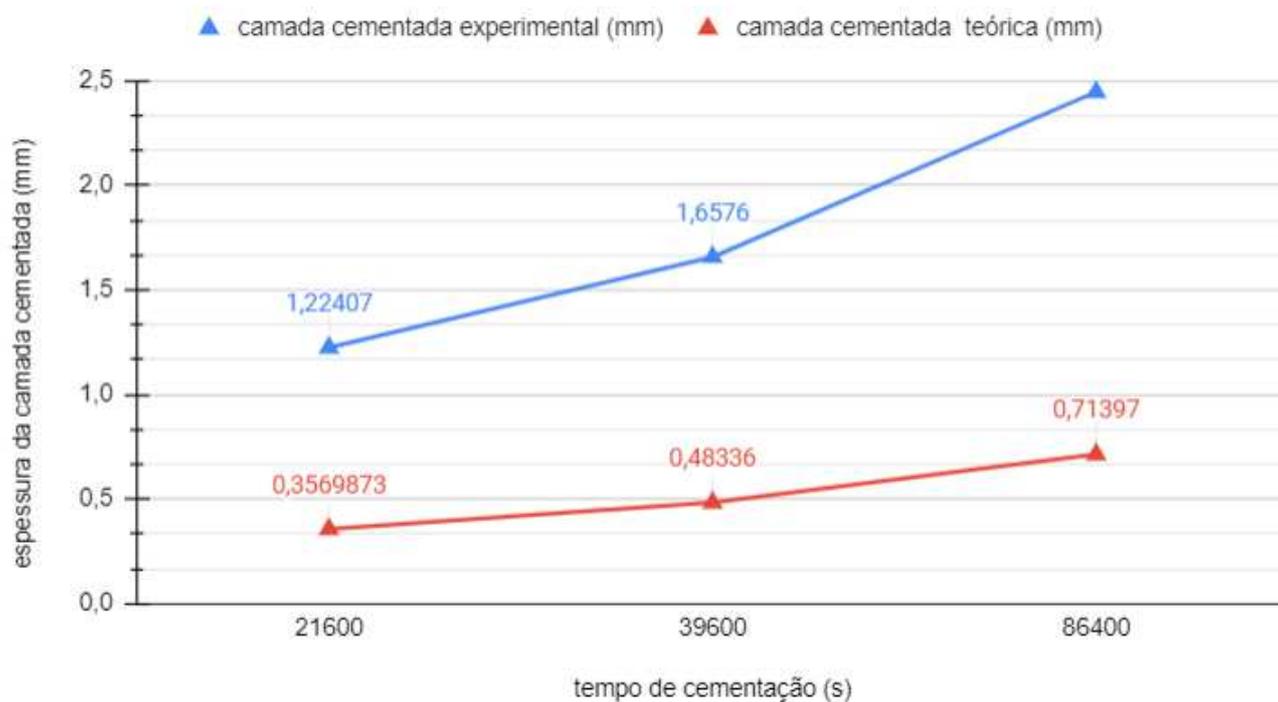


Figura 11 – Gráfico comparativo entre os valores projetados e teóricos de camada cementada no trabalho de Muniz et al (2017)

Autor

Silva (2019) em seu trabalho de conclusão de curso realizou experimento de cementação sólida em amostras de aço SAE 1020. A temperatura utilizada foi de 920 °C, e o tempo utilizado para o processo foi de 4 horas (14400 s). Dadas essas condições foi encontrada uma espessura de camada cementada de aproximadamente 0,35 mm. Para a determinação desta espessura de camada, o autor do trabalho utilizou um Microscópio ótico Zeiss Imager.M2m com software integrado AxioVision, a fim de realizar a análise microestrutural.

Utilizando a equação 2.4, encontramos uma camada cementada de  $x = 0,33129$  mm. A memória de cálculo encontra-se no apêndice E, deste trabalho.

Este valor encontrado pelos cálculos teóricos, pode ser considerado condizente com o que foi encontrado de forma experimental pelo trabalho.

Ihom (2013), publicou seu trabalho em que realizou o processo de cementação sólida em amostras de aço de baixo teor de carbono. Para este estudo o autor avaliou diferentes atmosferas cementantes combinando carvão vegetal e ossos de vaca como ativador do processo, para a temperatura de 900 °C e tempo de 8 horas ( 28800 s). As atmosferas cementantes utilizadas fora.

Dessa forma para diferentes composições utilizando os dois produtos para a formação

da atmosfera cementante, o autor encontrou experimentalmente camadas cementantes variando e entre 0,96 mm e 2,96 mm. Para a determinação do tamanho da camada cementada, foi utilizado o teste de dureza vickes. Foram realizadas medições na peça cementada de sua parte externa, até o seu interior. Assim chegou-se ao ponto em que a dureza não se alterou mais. Desse modo determinou-se o tamanho da camada cementada.

Através de relação matemática, obtemos uma camada cementada teórica de  $x = 0,4122$  mm. A memória de cálculo encontra-se no apêndice F deste trabalho.

Este experimento demonstra como a variação da composição do meio cementante é capaz de alterar o processo de cementação em termos da dureza atingida e do tamanho da camada cementada.

A figura 12, mostra o gráfico de dispersão com os valores de camada cementada experimentais e teóricos, encontrados nas pesquisas utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho. Observa-se que a medida que os valores experimentais crescem, os valores teóricos também crescem. A linha de tendência deixa claro esse comportamento.

A partir da linha de tendência representada no gráfico da figura 12, calculamos o coeficiente de inclinação dessa reta ( cálculos encontram-se no apêndice G, ao final deste trabalho).

Observamos que o valor de 2,77 encontrado como coeficiente de inclinação da reta, pode ser usado em alguns casos apresentados de comparação entre os valores experimentais e teóricos para a espessura da camada cementada como um fator de correção para a equação 2.4.

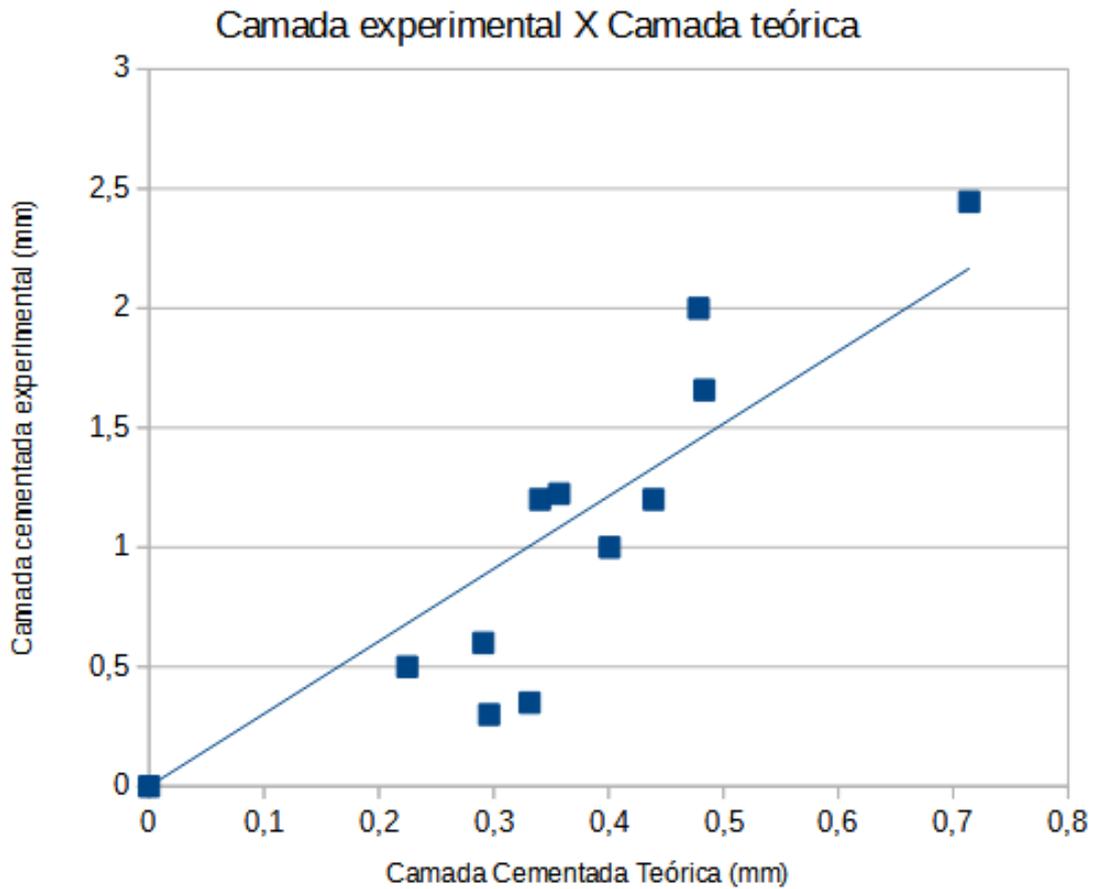


Figura 12 – Gráfico de dispersão contendo os valores encontrados para a camada cementada teórica e experimental

Autor

Os fornos utilizados nos experimentos, apresentam incertezas nas medições da temperatura. Tomando por base o trabalho de Ihom (2013) que afirma que a sensibilidade em relação a temperatura é de  $5^{\circ}C$ , para fornos do tipo mufla (figura 13). Foram realizados os novos cálculos para os coeficientes de difusão (equação 2.3) e para a camada cementada teórica (equação 2.4). Dessa forma, a tabela 4 apresenta os valores máximos e mínimos de camada cementada teórica que foram apresentados neste presente trabalho.



Figura 13 – Imagem ilustrativa de um forno mufla)

Autor

Tabela 4 – Valores Teóricos Máximos e Mínimos para Espessura de Camada Cementada

Experimental (mm)	Teórica (mm)	Teórica Máx. (mm)	Teórica Mín. (mm)
0,3	0,296	0,3061	0,2869
0,6	0,291	0,3012	0,2823
1,2	0,41810,8	0,4329	0,4057
1,0	0,38167	0,39525	0,37038
0,5	0,22473	0,23227	0,2176
1,2	0,34023,8	0,35165	0,32952
2,0	0,47839	0,4944	0,46399
0,4 /0,6	0,22577	0,2333	0,2186
1,22407	0,35688	0,369	0,3457
1,6576	0,48333	0,499	0,46815
2,4454	0,7139	0,7379	0,69150
0,35	0,33129	0,3414	0,3215
0,96/296	0,4129	0,426	0,39924

Do exposto, observamos que na a comparação entre a espessura da camada cementada avaliada teoricamente e a medida realizada experimentalmente que os valores encontrados foram muito discrepantes. Sendo que os valores foram mais discrepantes a medida que se aumentou o tempo de difusão.

A tabela 4, evidência que considerando as margens de erro relacionadas a medição de temperatura, há pouca variação nos valores calculados teóricamente. Dessa forma, não se pode afirmar que a discrepância entre os valores experimentais e teóricos encontram-se dentro de uma faixa aceitável de erros.

A equação 2.4 mostrou-se de pouca eficiência para a estimar a espessura da camada cementada. A explicação para este fato é a de que esta equação leva em consideração apenas o tempo do processo e o coeficiente de difusão. Sendo assim ela desconsidera demais fatores, como o gradiente inicial de carbono da peça a ser cementada, a quantidade de ar dentro da caixa, o aquecimento do compartimento. Estes fatores foram citados por Abdulrazzag (2016).

Este fato, de dificuldade de prever a espessura da camada cementada, está de acordo com o que foi avaliado como sendo uma das desvantagens do processo de cementação sólida, que é justamente o fato de não se ter um controle da profundidade da camada cementada.

Ao analisarmos o gráfico 13, que compara a camada cementada experimental com a camada cementada teórica, observamos que a medida que a experimental aumenta, a teórica também aumenta. A partir deste fato, foi traçada a linha de tendência dos pontos e verificado que o coeficiente de inclinação da reta que representa essa linha de tendência, no valor de 2,77 pode ser usado como um valor de correção da equação 2.4 para alguns dos casos, avaliados nesta pesquisa.

## 5 CONCLUSÕES

Com o presente trabalho foi possível realizar uma introdução e análise dos pormenores do processo de cementação sólida, avaliando suas vantagens e desvantagens.

No que tange a espessura da camada cementada, em primeiro lugar vale destacar, que apesar de existirem inúmeros trabalhos sobre o processo de cementação, há pouca literatura especificando qual foi a profundidade de camada cementada atingida. A maioria dos trabalhos encontrados durante o processo de pesquisa abrange a dureza superficial atingida, sem, no entanto deixar claro qual a profundidade desta camada. Isso pode ser explicado pela dificuldade de se obter esta medição, visto que para realizar este processo é necessário avaliar gradativamente as camadas superficiais da peça em direção ao interior da peça para averiguar até que ponto foi introduzido carbono efetivamente no material. Assim, trata-se de uma medição que necessita de técnicas avançadas de microscopia eletrônica.

Este estudo preliminar mostrou que existe uma discrepância grande entre os valores simulados teoricamente e os valores que foram encontrados com a realização prática do processo de cementação. Essa diferença entre os valores é ainda maior quando se mantém uma mesma temperatura e aumenta-se o tempo do processo. No geral, as camadas cementadas experimentais apresentaram valores muito superiores às teóricas.

Pode-se concluir dessa forma que o tratamento termoquímico de cementação sólida é recomendado para situações em que não são exigidas especificações técnicas muito rigorosas no que tange a espessura da camada cementada, dada a dificuldade de se prever e ter o controle exato da espessura da camada durante o processo.

### 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

As seguintes pesquisas são sugeridas para trabalhos futuros:

- Realizar o experimento de cementação sólida. Avaliar o aumento de dureza superficial.
- Realizar o experimento de cementação sólida variando o meio cementante. Comparar qual foi o aumento de dureza para as diversas atmosferas cementantes utilizadas.
- Avaliar a estrutura micrográfica da peça cementada. Realizar o ensaio de charpy da peça a fim de verificar a tenacidade da mesma.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABDULRAZZAG, Mohammed Abdulraoff. **Investigation the Mechanical Properties of Carburized Low Carbon Steel**. Journal of Engineering Research and Application. vol. 2. p. 59-64. 2016.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 7480/2007. Rio de Janeiro, 2000.
- [3] ALVIM, Marta Barbosa; CARDOSO, Rogério Antão; FARIA, Geraldo Lucio de; MOREIRA, Paulo Sérgio. **Estudo comparativo das características do tratamento termoquímico de cementação sólida de aço baixo carbono realizado com carvão vegetal e coque de baixa qualidade metalúrgica**. Anais do Enemet - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas. v. 17. n.1. 2017.
- [4] BARBOSA, Flavio; Cury, Augusto. **Apostila de Laboratório de Resistência dos Materiais da Faculdade de Engenharia da UFJF**. 2019.
- [5] CALLISTER, William D. Jr. **Ciências e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Editora LTC, v. 7, p. 91, 2006.
- [6] CARDOSO, Josimar. **Cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos módulo 2 de aço SAE 4320**. Trabalho de Conclusão de Curso Superior em Tecnologia de Fabricação Mecânica. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - Campus Jaraguá do Sul. 2019.
- [7] CHIAVERINI, Vicente. **Tratamento Térmico das Ligas Metálicas**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2008.
- [8] CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica - Processos de fabricação e Tratamento**. Editora McGraw Hill, v.2, p.245, 1986.
- [9] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.v.7. 2005.
- [10] COSTA E SILVA, André Luiz V. da; MEI, Paulo Roberto, **Aços e Ligas Especiais**. Editora Edgard Blücher, 3ª edição, 2010, p. 147 – 154.

- [11] GARCIA, Natália Gonçalves. **Estudo da Cementação Sólida em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos de Aço SAE 4320**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade de Federal de Santa Catarina. 2015.
- [12] GENTIL, Marcos Oliveira; SANTOS, Sandro Oliveira dos; CINTRA, Elaine Pavini. **Carbonetação de aço ASI 8620 utilizando biomassa de celulose e carboneto de cálcio**. Revista Científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Volume 20. Número 3, p 232-235. 2019.
- [13] GOUVEIA, Caio Vinicius de Oliveira; SANTANA, Helber José Cunha; RAMOS, Julimar Pereira; BENTO, João Alves. **Análise metalográfica da influência do tempo de cementação sólida em aço SAE 1020** . Anais do Curso de Engenharia Mecânica da UniEVANGÉLICA. Volume 02. 2018.
- [14] IHOM, Paul Aondona. **Case hardening of mild steel using cowbone as energiser**. Departament of Mechanical Engeneering, University of Uyo. 2013.
- [15] LEITÃO, José Cláudio; MEI, Paulo Roberto; LIBARDI, Paulo Rodolfo. **Efeitos da cementação e da nitretação no custo e na qualidade de engrenagens de aços produzidas com aços ABNT 4140 e 8620**. Technol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 9, n. 3, p. 257-263, jul.-set. 2012.
- [16] LUZ, Álvaro José da. **Estudo tribológico da camada cementada do aço SAE 1020**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de São João Del -Rey. Julho de 2018.
- [17] MUNIZ, Tainan Ferreira. CHELONI, Letícia Maria de Melo Silva. MENDES, Milena Kellen Oliveira. **Estudo da Etapa de Cementação no estado sólido de um aço AISI 5115 para aplicações com resistência ao desgaste superficial**. Anais do Congresso Anual da ABM. v.71, num. 1. 2017.
- [18] PATAN, Gustavo Kohl. **Tratamento termoquímico de centação 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 em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pampa. 2018.
- [19] PEREIRA, Raul. **Ajuste da composição química do aço CA-50 em usina siderúrgica semi-integrada**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnó-

logo em Tecnologia em Processos Metalúrgicos) – Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro. 2009.

[20] SANTOS, G. P. et al. **Cementação Sólida no Aço SAE 8620**. XX-VIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE. Ijuí, RS, 2017.

[21] SCHNEIDERS, Cristiane Mariele. **Usinabilidade dos aços de cementação**. Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina. 2017.

[22] SILVA J.P.T. **Processo de cementação nos aços ABNT 1020 e 1045 com variação do meio cementante**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde. 2013.

[23] SILVA, Soraya Karolinne Castro. **Análise da variação das propriedades microestruturais de um aço SAE 1020 após tratamento de cementação em caixa**. Trabalho de Conclusão de curso. Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceara. 2019.

## APÊNDICE A – PRIMEIRO

Memória de cálculo para o trabalho de Santos et al (2017).

Para a temperatura de 925°C por um tempo de 3 horas (10800 s), encontrou-se uma espessura de camada cementada de 0,3 mm.

A fim de determinar o valor teórico da camada cementada, devemos inicialmente calcular, o coeficiente de difusão do carbono no ferro em sua fase austenítica, visto que este valor não é tabelado.

Dessa forma utilizamos a equação 2.3, sabendo que :

$D_0 = (2,3 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s})$  (obtido pela tabela representada na figura 9).

$Q = 148000 \text{ (J/mol)}$  (obtido pela tabela representada na figura 9).

R é a constante universal dos gases, onde temos que  $R = 8,314 \text{ (J/mol} \cdot \text{K)}$ .

Para o cálculo devemos converter a temperatura que está em graus Celsius para Kelvin. Portanto:  $T = 925 \text{ }^\circ\text{C} = 1198 \text{ K}$ .

Logo:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (\text{A.1})$$

$$D = 2,3 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{-148000}{8,314 \cdot 1198}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$D = 2,3 \cdot 10^{-5} \exp(-14,86) \quad (\text{A.3})$$

Assim, obtemos um valor de coeficiente de difusão de :  $D = (8,093 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ .

Logo realizando os cálculos teóricos para este coeficiente de difusão e tempo de 3 horas (10800 s), utilizando a equação 2.4, temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{8,093 \cdot 10^{-12} \cdot 10800}$$

$$x = 0,296 \text{ mm}$$

Para a temperatura de 900°C por um tempo de 4 horas (14400 s), encontrou-se uma espessura de camada cementada de 0,6 mm.

Realizando os cálculos através da equação 2.4 e utilizando o coeficiente de Difusividade do carbono na austenita observado na tabela da figura 9 para a mesma temperatura ( $5,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ), temos :

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 14400}$$

$$x = 0,291 \text{ mm}$$

Para a temperatura de  $925^{\circ}\text{C}$  por um tempo de 6 horas (21600 s), encontrou-se uma espessura de camada cementada de 1,2 mm.

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{8,093 \cdot 10^{-12} \cdot 21600}$$

$$x = 0,41810 \text{ mm}$$

Para a temperatura de  $925^{\circ}\text{C}$  por um tempo de 5 horas (18000 s), encontrou-se uma espessura de camada cementada de 1,0 mm.

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{8,093 \cdot 10^{-12} \cdot 18000}$$

$$x = 0,38167 \text{ mm}$$

## APÊNDICE B – SEGUNDO

Cálculos realizados para o as condições do trabalho de Garcia (2015).

A temperatura utilizada para os experimentos foi de 900° C. Para esta temperatura temos o coeficiente de difusão do carbono na austenita, que encontra-se na figura 9, ( $D = (5,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ ).

Para o tempo de cementação de 2,378 horas foi encontrado experimentalmente uma espessura de camada cementada de 0,5 *mm*.

Realizando o cálculo teórico, através da equação 2.4:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 8560,8}$$

$$x = 0,22473 \text{ mm}$$

Para o tempo de cementação de 5,450 horas foi encontrada experimentalmente uma espessura de camada cementada de 1,2 *mm*.

Realizando o cálculo teórico, através da equação 2.4:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 19620}$$

$$x = 0,34023 \text{ mm}$$

Para o tempo de cementação de 10,773 horas foi encontrada experimentalmente uma espessura de camada cementada de 2,0 *mm*.

Realizando o cálculo teórico, através da equação 2.4:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 38782,8}$$

$$x = 0,47839 \text{ mm}$$

**APÊNDICE C – TERCEIRO**

Cálculos para o trabalho de Cardoso (2019).

Realizando o cálculo teórico através da equação 2.4. utilizando o coeficiente de difusão do carbono na austenita para a temperatura de 900° C, que encontra-se na tabela representada na figura 9 ( $5,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ), e para um tempo de 2,4 horas (8640 s) temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 8640}$$

$$x = 0,2257786 \text{ mm}$$

## APÊNDICE D – QUARTO

Memória de cálculo para o trabalho de Muniz et al (2017).

Para o tempo de 6 horas, a camada cementada projetada pelos autores foi de 1,22407 *mm*.

Utilizando a equação 2.4, sendo o coeficiente de difusão do carbono na austenita para a temperatura de 900° C, que encontra-se na tabela representada na figura 9 ( $5,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ), temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 21600}$$

$$x = 0,3569873 \text{ mm}$$

Para o tempo de 11 horas, a camada cementada projetada pelos autores foi de 1,6576 *mm*. Utilizando a equação 2.4, temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 39600}$$

$$x = 0,48336 \text{ mm}$$

Para o tempo de 24 horas, a camada cementada projetada pelos autores foi de 2,4454 *mm*. Utilizando a equação 2.4, temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 86400}$$

$$x = 0,71397 \text{ mm}$$

## APÊNDICE E – QUINTO

Memória de cálculo utilizada para o trabalho de Silva (2019).

Utilizando a equação 2.3, é possível determinar o coeficiente de difusão do carbono na austenita.

Dessa forma consideramos os valores:

$D_0 = (2,3 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s})$  (obtido pela tabela representada na figura 9).

$Q = 148000 \text{ (J/mol)}$  (obtido pela tabela representada na figura 9).

$R$  é a constante universal dos gases, onde temos que  $R = 8,314 \text{ (J/mol} \cdot \text{K)}$ .

Para o cálculo devemos converter a temperatura que está em graus Celsius para Kelvin. Portanto:  $T = 920 \text{ }^\circ\text{C} = 1193 \text{ K}$ .

Logo:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \quad (\text{E.1})$$

$$D = 2,3 \cdot 10^{-5} \exp\left(\frac{-148000}{8,314 \cdot 1193}\right) \quad (\text{E.2})$$

$$D = 2,3 \cdot 10^{-5} \exp(-14,92) \quad (\text{E.3})$$

Assim, obtemos um valor de coeficiente de difusão de :  $D = (7,6218 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s})$ .

Assim com esse coeficiente de difusão calculado, obtemos a camada cementada teórica.

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{7,6218 \cdot 10^{-12} \cdot 14400}$$

$$x = 0,33129 \text{ mm}$$

**APÊNDICE F – SEXTO**

Memória de cálculo para o trabalho de Ihom(2013).

Utilizando a equação 2.4, sendo o coeficiente de difusão do carbono na austenita para a temperatura de 900° C, que encontra-se na tabela representada na figura 9 ( $5,9 \cdot 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ), para um tempo de cementação de 8 horas (28800 s) temos:

$$x = \sqrt{D \cdot t}$$

$$x = \sqrt{5,9 \cdot 10^{-12} \cdot 28800}$$

$$x = 0,4122 \text{ mm.}$$

**APÊNDICE G – SÉTIMO**

Cálculos para o coeficiente de inclinação da reta.

Pontos escolhidos:  $y_1 = 0mm$ ;  $y_2 = 0,5mm$ ;  $x_1 = 0mm$ ;  $x_2 = 0,18mm$ .

Logo;

$$x = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{G.1})$$

$$x = \frac{0,5}{0,18} \quad (\text{G.2})$$

Dessa forma obtemos um coeficiente de inclinação da reta de  $x = 2,77$ .

**ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE****UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA****Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria**

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral<sup>1</sup> e criminais previstas no Código Penal<sup>2</sup>, além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 06 de Novembro de 2017.

---

Nome completo – Discente  
Matrícula: – CPF:

<sup>1</sup> LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

<sup>2</sup> Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.