

## ESTUDO TEÓRICO DA INFLUÊNCIA DO TEMPO DE TRATAMENTO NA CEMENTAÇÃO SÓLIDA E DO USO DO CARBONATO DE CÁLCIO COMO ATIVADOR EM AÇOS.

*Lucas Samuel Pereira Rocha de Lima<sup>1</sup>, Francisco Edson Nogueira Fraga<sup>2</sup>.*

**Resumo:** Este trabalho tem por objetivo a comparação dos resultados na literatura científica que analisam a influência do tempo de tratamento na cementação sólida e do uso de carbonato de cálcio como ativador em aços. A composição do ativador carbonato de cálcio e o tempo de tratamento são variados para a obtenção de uma gama de dados que serão comparados quanto a seus resultados de dureza, profundidade da camada cementada e microestrutura, permitindo examinar o efeito dessas variáveis. A importância de conhecer a influência destas variáveis é poder definir qual condição é suficiente para obtenção das propriedades mecânicas desejadas com um menor custo de tratamento térmico. O tempo de tratamento destaca-se como uma das variáveis de influência mais relevantes nesse tipo de tratamento. O aço baixa liga se destaca para a produção de peças a serem tratadas por difusão, por conter outros elementos de liga que auxiliam para o resultado final do tratamento térmico relativo às propriedades mecânicas na superfície da peça. O tratamento termoquímico superficial de cementação sólida tem o propósito de obter peças com elevada dureza superficial, elevada resistência à fadiga e ao desgaste, mantendo tenacidade e ductilidade em seu interior. Os resultados desta pesquisa mostraram que a dureza e a profundidade da camada cementada aumentaram com o aumento do tempo de cementação e com o uso do ativador carbonato de cálcio.

**Palavras-chave:** Dureza superficial; Difusão; Ductilidade; Camada cementada;

### 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de cementação é utilizado com o objetivo de proporcionar maior resistência ao desgaste, à corrosão, à oxidação em altas temperaturas, à fadiga e principalmente proporcionar o endurecimento superficial, enquanto o interior da peça cementada mantém tenacidade, esse processo acontece pela adição de carbono, por difusão, na superfície do aço [1].

Essa possibilidade de se aliar uma superfície dura com um núcleo mais tenaz é de grande aplicação, sobretudo porque, com emprego de aços com elementos de liga, pode-se conseguir núcleo de elevada resistência e tenacidade, com superfície extremamente dura, resultando num material capaz de suportar em alto grau certos tipos de tensão [2].

O estudo dos parâmetros do processo durante o tratamento tem sido de interesse da indústria ao longo dos anos, entre elas, se destacam as pesquisas nas propriedades mecânicas para a melhoria de vida e desempenho de peças em variadas áreas de pesquisa do ramo automobilístico e espacial. Os principais parâmetros de influência na cementação são o tempo e a temperatura de cementação, porém fatores como ativadores, geometria da peça, custos de equipamentos e a obtenção de propriedades desejadas são avaliadas para escolha do melhor processo de tratamento termoquímico, bem como o meio fornecedor de carbono para o processo de difusão também é analisado.

A temperatura de cementação afeta grandemente a profundidade efetiva cementada, no caso do processo de cementação. A temperatura de cementação está geralmente entre 850 e 950°C em que a solução do carbono no ferro é mais fácil, já que o ferro se encontra na forma alotrópica gama. Já que na região austenítica existe uma elevada solubilidade para o carbono e a profundidade da camada cementada é função do tempo de cementação e do potencial de carbono disponível na superfície. Há na literatura a possibilidade da obtenção de maiores temperaturas, em que a temperatura é aumentada constantemente até 1090°C [2].

Os aços para a cementação geralmente têm base no teor de carbono de cerca de 0,2%. O conteúdo da camada cementada geralmente está sendo controlado entre 0,8% e 1% [2]. A cementação é, basicamente, um processo de difusão, isto é, movimento do carbono no interior do aço.

Os ativadores, em geral são compostos de carbonato, como carbonato de bário ( $\text{BaCO}_3$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). O ativador intensifica o processo de difusão, consequentemente garante maior eficiência do tratamento. Muitos trabalhos investigam diferentes materiais como ativador no processo, neste trabalho será apresentado a casca de ovo como ativador, por exemplo.

A eficiência do ativador carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) comparada a ativadores utilizados na literatura científica é estudada nesse trabalho, analisando suas reações químicas em relação ao processo de difusão. O carbonato de cálcio é proposto como viável quando comparado a outros ativadores utilizados, considerando que pode ser admitido como um ativador verde, que não polui o meio ambiente, e que não prejudica a saúde do operador. Para uma melhor contribuição do tema, o estudo tem por objetivo reunir e estudar os parâmetros do tratamento termoquímico de cementação, partindo de referências bibliográficas. Para verificação desses

parâmetros, foram analisados os resultados de diversos trabalhos que confirmaram a influência desse processo na dureza, profundidade da camada cementada, e os resultados da microestrutura formada.

## 2. DESENVOLVIMENTO

A necessidade de pesquisa e desenvolvimento de processos industriais ecologicamente corretos é considerada um dos campos de pesquisa mais importantes na área da ciência e tecnologia. O processo de cementação sólida é de grande importância para a indústria metalúrgica, já que esse processo aumenta o desempenho e vida útil dos componentes mecânicos.

Como a cementação funciona pelo mecanismo de movimento de átomos por meio de um gradiente de concentração, é necessário conhecer o mecanismo de difusão do elemento adicionado, bem como a influência dos fatores relacionados com a cementação, seja o tempo de tratamento, presença do ativador ou temperatura de cementação. A seguir é abordada a influência desse mecanismo de difusão no processo de tratamento termoquímico de cementação sólida, como a reação química que ocorre, e como a escolha desses fatores contidos no processo influenciará o resultado do estudo.

### 2.1. Difusão

Difusão pode ser definida como a alteração da composição química resultante do movimento dos átomos, induzidos por agitação térmica, podendo ocorrer transporte de massa de uma região de maior concentração para uma de menor concentração [3].

Os métodos de endurecimento superficial por difusão incluem várias espécies em difusão (carbono, nitrogênio, boro, entre outros) e do método de processo usado para o manuseio e transporte das espécies difusivas para a superfície da peça [4].

O processo de cementação é controlado pela difusão do carbono através da superfície do material, sendo este muito influenciado pela temperatura, potencial de carbono do meio cementante e o tempo de processo [5]. A importância do conhecimento da influência destas variáveis é poder encontrar qual condição é suficiente para obter as propriedades mecânicas desejadas com um menor custo.

A temperatura tem uma influência das mais significativas sobre os coeficientes e as taxas de difusão. A relação da dependência dos coeficientes de difusão em relação a temperatura é dada pela equação (1).

$$D = D_0 e^{\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)} \quad (1)$$

Onde,

$D_0$  = Constante característica do sistema de difusão ( $m^2/s$ )

$Q_d$  = Energia de Ativação para a difusão ( $J/mol$  ou  $cal/mol$ ).

$R$  = Constante universal dos gases ( $8,31 J/(mol.K)$ )

$T$  = Temperatura absoluta (K).

A Tabela 1 informa diferentes valores da constante de difusão e energia de ativação para os elementos mais comumente usados para o processo de difusão.

**Tabela 1.** Dados sobre a difusão do B, C e N no ferro [1].

| Elemento   | Ferro $\alpha$       |           | Ferro $\gamma$     |           |
|------------|----------------------|-----------|--------------------|-----------|
|            | $D_0$                | $Q_d$     | $D_0$              | $Q_d$     |
|            | $cm^2/s$             | $cal/mol$ | $cm^2/s$           | $cal/mol$ |
| Boro       | $10^{+6}$            | 62.000    | $2 \times 10^{-3}$ | 21.000    |
| Carbono    | $3,3 \times 10^{-3}$ | 19.300    | $10^{-2}$          | 27.000    |
| Nitrogênio | $7,8 \times 10^{-3}$ | 18.900    | 0,91               | 40.000    |

Percebe-se que os valores para o Ferro  $\gamma$  possuem valores maiores que o Ferro  $\alpha$  para o carbono, isso significa que a difusão acontecerá mais rapidamente nessa região.

Diversos produtos podem ser utilizados como meio fornecedor de carbono para este tratamento, bem como vários outros produtos podem ser utilizados como ativadores para intensificar o processo de difusão e consecutiva maior eficiência do tratamento.

### 2.2. Tratamento termoquímico

Tratamentos termoquímicos são processos que visam à adição, por difusão, de elementos químicos (carbono, nitrogênio, boro, entre outros) na superfície do aço [1]. O objetivo principal do tratamento termoquímico é o incremento da resistência na superfície, quando no processo seu núcleo permanece tenaz. Como exemplo uma engrenagem, que demanda elevada dureza e resistência ao desgaste nos seus dentes, porém deve manter a tenacidade no seu interior. A alteração de composição química do aço até uma certa profundidade depende da

temperatura de aquecimento e do tempo de permanência à temperatura de tratamento, que está em contato com o meio em questão. A modificação parcial da composição química, seguida geralmente de tratamento térmico apropriado, produz também uma alteração na estrutura do material, resultando em uma modificação igualmente parcial das propriedades mecânicas [2]. Os fatores que influenciam no controle do processo são [1]:

a) Potencial do meio (sólido, líquido, gasoso ou plasma), em que a peça está imersa, de fornecer o elemento químico (carbono, nitrogênio, boro entre outros);

b) Capacidade da peça absorver este elemento químico. Isso está relacionado com a solubilidade e a difusão do elemento químico no aço.

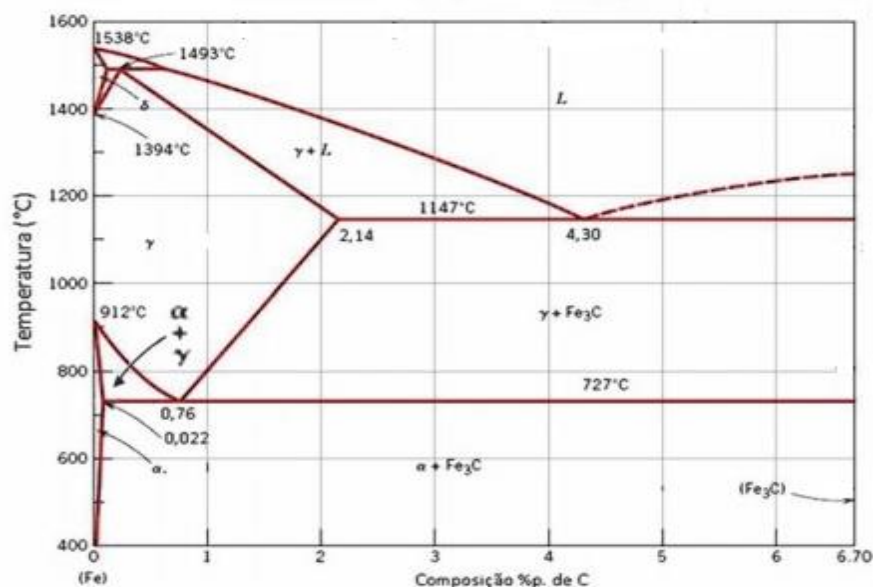
Quando esse processo visa o fornecimento de carbono à superfície do aço, geralmente em contato com ativadores, é chamado de cementação. Na Tabela 2 é mostrado um resumo sobre os principais tratamentos termoquímicos dos aços quanto a seu elemento difundido e temperatura.

**Tabela 2.** Características de alguns tratamentos termoquímicos [4].

| Processo             | Elemento difundido   | Temperatura °C |
|----------------------|----------------------|----------------|
| Cementação sólida    | Carbono              | 815-1090       |
| Nitretação gasosa    | Nitrogênio           | 500-550        |
| Cianetação (líquida) | Carbono + Nitrogênio | 760-870        |
| Boretção             | Boro                 | 700-1000       |

Para realizar o tratamento de cementação do aço de forma eficiente, é necessário que o aço ao entrar em contato com a substância que irá fornecer o carbono, seja aquecido a uma temperatura na qual a solução do carbono no ferro seja fácil [2]. Para isso, a temperatura deve estar acima da zona crítica, no diagrama de equilíbrio ferro carbono (Figura 1) entre 850°C e 950°C, onde o ferro está na sua forma alotrópica gama, ou seja, na sua forma austenítica. Logo, os tratamentos de difusão no aço serão significativamente mais rápidos a partir da temperatura austenítica, pois a estrutura CFC (ferro  $\gamma$ ) tem maior espaçamento que a estrutura CCC (ferro  $\alpha$ ).

Os aços escolhidos normalmente para serem submetidos ao processo de cementação são os aços-carbono e os aços baixa liga. Os dois tipos possuem baixo teor de carbono, entre 0,08% e 0,40% [2]. Quanto mais carbono for necessário no processo, mais a temperatura é aumentada. A Figura 1 mostra a zona de cementação para esse intervalo de concentração de carbono, na temperatura de cementação.



**Figura 1.** Diagrama de fases ferro-carbono de ferro. Adaptado de [3].

Temperaturas superiores a 950°C estão sendo usadas com o objetivo de otimizar o processo, deixando-o mais rápido, já que o carbono se difunde mais rapidamente em temperaturas mais elevadas. Esse processo é utilizado quando se deseja camadas mais espessas, como por exemplo de 1,25 mm [4]. Porém essas temperaturas podem causar um aumento exagerado do grão austenítico, como quanto maior o tamanho de grão, menor é a tenacidade do material, logo este efeito se torna indesejado, o que pode ser evitado usando mecanismo de prevenção ao crescimento do grão.

A importância da temperatura pode ser vista pela Equação 1, pois ela afeta diretamente a difusão dos átomos, acelerando as partículas com sua elevação, como também influencia na concentração de carbono na austenita [2]. Portanto, o nível médio desejado de carbono depende diretamente da temperatura de cementação.

Neste estudo teórico, os trabalhos analisados também variaram as temperaturas de cementação, o que não é buscado nesse trabalho. As temperaturas estudadas de todos os trabalhos ficaram dentro da temperatura austenítica, ou seja, entre 850°C e 950°C, porém não foram adotadas temperaturas uniformes.

### 2.3. Cementação sólida

No tratamento de cementação as peças de aço são colocadas em caixas metálicas com a presença de misturas carburizantes [2]. Essas misturas geralmente apresentam carvão madeira com a presença de cerca de 5% a 20% de ativadores, por meio de um óleo comum.

A formação da reação química responsável pela cementação é forçada por ativadores, tais como carbonato de bário ( $\text{BaCO}_3$ ), carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), carbonato de potássio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) e carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), que estão presentes no composto carburante [4].

O carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) vem se mostrando viável já que é considerado um ativador ecologicamente correto, aliado a um resultado satisfatório comparado a outros ativadores utilizados. Na cementação, independente do processo adotado, é considerado os seguintes pontos: Deve-se partir de um aço baixo carbono; a temperatura do processo deve colocar o estado austenítico, em geral entre 850°C a 950°C [2].

O teor de carbono obtido na superfície do trabalho, como também o potencial de carbono da atmosfera gerada pelo composto da cementação, aumenta diretamente com o aumento na proporção de monóxido de carbono (CO) para dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Assim, mais carbono é disponibilizado na superfície de trabalho pelo uso dos ativadores e materiais de cementação que promovem a formação do monóxido de carbono (CO) [4].

Conforme encontrado na literatura o processo de cementação do aço é função tanto do tempo como da fonte de carbono na superfície [4]. Após o processo de cementação, de forma opcional, realiza-se o processo de tratamento térmico de têmpera. Com esse resfriamento rápido o material obterá estrutura martensítica na superfície [1].

Será discutido a influência desse processo na microestrutura e na profundidade da camada cementada, que é medida, na prática, através da dureza. Chama-se camada cementada efetiva a região com dureza maior que 50HRC, ou a camada efetiva total que é definida como a região onde houve maior teor de carbono [1]. Para se entender toda a influência do ativador e do processo de cementação sólida, é analisada as reações químicas que ocorrem no processo e que possibilitam o fornecimento de carbono para a superfície.

### 2.4. Reações químicas no processo de cementação sólida

O princípio fundamental do processo de cementação sólida, se baseia na formação através de reações termoquímicas do gás monóxido de carbono (CO) e sua reação com a microestrutura austenítica ( $\text{Fe } \gamma$ ), promovendo em elevada temperatura (850° a 950°C) a difusão do carbono a partir da superfície em direção ao núcleo do material [4].

O meio fornecedor de carbono exerce um papel fundamental para a reação química que acontece no processo de cementação sólida, pois é esse material que irá atuar como fonte de carbono para difusão na superfície do material, possibilitando seu endurecimento. É encontrado na literatura vários meios que fornecem carbono para o processo, dentre eles estão o pó do ferro fundido cinzento e o pó de carvão de eucalipto. Assim as reações principais em uma cementação sólida, são:

- À temperatura elevada, típica do processo de cementação sólida, o carbono combina-se com o oxigênio do ar:



- O  $\text{CO}_2$  reage com o carbono do carvão incandescente:



- O CO por sua vez reage com o ferro do aço, introduzindo o carbono:



- O  $\text{Fe}_3\text{C}$  se dissolve na austenita ( $\gamma$ )

- O  $\text{CO}_2$  reage novamente com o carbono do carvão incandescente, o ciclo se repete enquanto houver carbono suficiente presente para reagir com o dióxido de carbono, já que é necessário que tenha suficiente quantidade de dióxido de carbono aplicado, para dar, após a reação com o carvão, um suprimento contínuo de monóxido de carbono para cementação [2].

O ativador contribui no aumento da velocidade do fornecimento do CO. Existem vários carbonatos naturais que podem ser encontrados em materiais carbonatados, como calcário e casca de ovo [6]. O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) da decomposição dos ativadores reage com o carbono no carvão vegetal e produz gás CO. O gás CO, então, reage com a superfície do aço e difunde-se na superfície conforme segue a reação do carbonato de bário ( $\text{BaCO}_3$ ):



O carbonato de bário está sendo proibido em diversos países. Neste trabalho foi analisado a influência do ativador carbonato de cálcio no processo e comparado com a literatura científica.

## 2.5. Carbonato de cálcio como ativador

O  $\text{CaCO}_3$ , é um pó branco, inodoro e não tóxico, que é originado da precipitação do calcário natural, apresentando elevado grau de pureza. Tem como característica ser insolúvel em água. Esta é uma propriedade importante na produção dos granulados uma vez que permite sua dispersão física totalmente no estado sólido [5].

Apresenta uma pureza de, aproximadamente, 99% de  $\text{CaCO}_3$ , com presença, geralmente, de 1% carbonato de magnésio  $\text{MgCO}_3$  e pequenas composições de outros elementos. Sua reação química ocorre de maneira semelhante ao carbonato de bário.



Como supracitado, o ativador intensifica o processo de difusão, pois está relacionado à sua capacidade de aumentar o potencial de carbono no meio difusivo, consequentemente garantindo maior eficiência de tratamento de cementação sólida [4].

Para o desenvolvimento do estudo teórico da influência do carbonato de cálcio, foi observada diferentes composições do carbonato de cálcio em cada trabalho analisado. A seguir, a Tabela 2 apresenta as variações das composições do carbonato de cálcio utilizadas na literatura.

**Tabela 3.** Dados sobre as composições de  $\text{CaCO}_3$  [Autoria Própria].

| Trabalhos estudados | Composições do $\text{CaCO}_3$ (%) |       |
|---------------------|------------------------------------|-------|
| BAUMGARTEN [5]      | 5,52                               | 10,45 |
| THAMMACHOT [6]      | -                                  | 10    |
| TORRES [7]          | 9,1                                | 13,1  |
| HAFNI [8]           | 5                                  | 20    |
| HASSAN [9]          | -                                  | 10    |

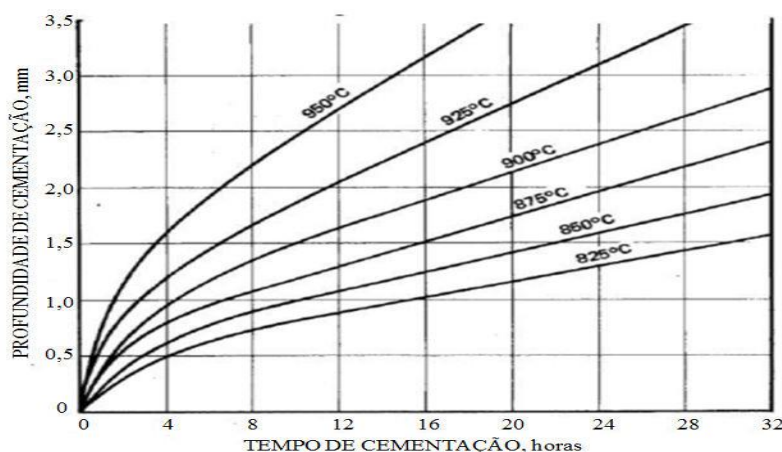
Foram usados como referência diversos artigos científicos sobre o assunto, inclusive trabalhos desenvolvidos no grupo de pesquisa sobre tratamentos de difusão em aços do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA [7,10]. Esse projeto já resultou em vários trabalhos sobre o assunto de difusão.

As influências dessas composições serão discutidas na seção resultados e discussões, na qual serão analisados os resultados de dureza, profundidade da camada cementada e microestrutura formada, a partir de cada formulação dada.

## 2.6. Tempo de tratamento

A taxa de variação da profundidade da camada cementada em uma determinada temperatura de cementação é proporcional à raiz quadrada do tempo [4]. Portanto, à medida que se busca maiores profundidades de cementação, maiores são os tempos de tratamento, essa taxa de cementação é assim mais elevada no início do ciclo e diminui gradualmente à medida que o ciclo se estende.

Desta forma, quanto maior a profundidade da camada desejada, maior o gasto de energia e ocupação do equipamento, então este processo se torna inviável quando se busca uma grande profundidade de camada cementada. A seguir é mostrada a relação de tempo e temperatura de cementação na profundidade da camada cementada, utilizando um ativador.



**Figura 2.** Influência do tempo e temperatura na profundidade da camada cementada [2].

Na região austenítica existe uma elevada solubilidade para o carbono, e a profundidade da camada cementada é função do tempo de cementação e do potencial de carbono disponível na superfície. Isso mostra que quanto mais tempo for mantido, mais profunda a penetração de carbono no ferro ou aço [2]. Procura-se evitar, entretanto, tempos longos, o que pode causar até a oxidação do material.

A Tabela 4 nos informa as variações do tempo de tratamento na temperatura de cementação dos trabalhos analisados, seguidos por resfriamento. Como mostra a Figura 2, o processo de cementação é bastante dependente do tempo e temperatura, porém há um valor que esses parâmetros prejudicam o resultado da cementação. Nessa pesquisa foi buscada a variação para pequenos tempos de tratamento para a avaliação dessa influência.

**Tabela 4.** Variação do tempo de tratamento [Autoria Própria].

| Trabalhos estudados            | Tempos de tratamento (h) |   |     |
|--------------------------------|--------------------------|---|-----|
| BAUMGARTEN <sup>(*)</sup> [5]  | 2                        | 4 | 8   |
| THAMMACHOT <sup>(**)</sup> [6] | 0,5                      | 1 | 1,5 |
| TORRES <sup>(***)</sup> [7]    | 1                        | 4 | 6   |

Nota: <sup>(\*)</sup> tratamento usando aço SAE 1020 e SAE 8620 com CaCO<sub>3</sub>;

<sup>(\*\*)</sup> tratamento usando aço AISI 1020 com CaCO<sub>3</sub>;

<sup>(\*\*\*)</sup> tratamento usando aço SAE 8620 com CaCO<sub>3</sub>;

Nos trabalhos analisados que estudaram a influência do carbonato de cálcio, 3 (três) também avaliaram a influência do tempo. Foram utilizados diferentes aços no processo, porém o ativador utilizado permaneceu uniforme, o CaCO<sub>3</sub>. A utilização dos aços para cementação é discutida posteriormente. O processo de cementação é bastante dependente do tempo e temperatura, como apresentado anteriormente, porém há um valor que esses parâmetros prejudicam o resultado da cementação.

## 2.7. Cementação de aços

Devido a sua alta resistência ao desgaste os aços são amplamente utilizados para o processo de cementação sólida. É geralmente concordado que a taxa de difusão do carbono no aço não é muito influenciada pela composição química do aço [4]. Porém, não apenas o tratamento termoquímico deverá ser considerado, o processo do tratamento térmico que a cementação exige também deve ser analisado. O processo de cementação é utilizado em aços carbono (AISI/ABNT 1010 a 1035) e aços baixa liga (AISI/ABNT 4617, 8620, 8627 entre outros) [1].

Os aços carbono ABNT/SAE 1020 e aços baixa liga ABNT/SAE 8620, são os mais comuns encontrados na indústria em geral. A escolha destas ligas se deve ao fato de que ambas têm a capacidade de absorver carbono em alta velocidade nas temperaturas de 870°C e 930°C, já que apresentam uma camada de enriquecimento superficial de carbono uniforme, além de considerável tenacidade, boa resistência mecânica no núcleo após o tratamento térmico e boa usinabilidade no seu estado bruto [5]. Nos trabalhos estudados foram aplicados os aços carbono e aços baixa liga.

Os aços carbono para a cementação possuem normalmente de 0,08% a 0,25% de carbono, sua utilização engloba o fato destes terem melhores características em empregos de até 300 HB [1]. O aço SAE 1020 também é considerado o aço mais comum para a cementação, o que o torna indicado a uma grande variedade de aplicações que desejam uma boa dureza superficial e resistência ao desgaste [2].

Aços baixa liga são os aços da série 31xx, 41xx, 46xx, 51xx, 61xx, 86xx, 87xx e 94xx, que possuem bons valores de resistência, superiores a 1000MPa, e bons valores de ductilidade [1]. Esses aços-liga são os que contêm um total de 1% a 2% de elementos de liga em condições adequadas [2]. A Tabela 5 mostra os elementos de liga e suas composições típicas para o aço baixa liga, muito utilizado no processo de cementação sólida.

**Tabela 5.** Aço baixa liga SAE para cementação [2].

| SAE  | C         | Mn        | P     | S     | Si        | Ni        | Cr        | Mo        |
|------|-----------|-----------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 8620 | 0,18/0,23 | 0,70/0,90 | 0,035 | 0,040 | 0,20/0,35 | 0,40/0,70 | 0,40/0,60 | 0,15/0,25 |
| 8627 | 0,25/0,30 | 0,70/0,90 | 0,035 | 0,040 | 0,20/0,35 | 0,40/0,70 | 0,40/0,60 | 0,15/0,25 |

Os aços baixa liga SAE da classe 86xx contém os mesmos valores dos outros elementos de liga, diferenciando a porcentagem do carbono na sua composição, relacionada a sua aplicação. Entre suas aplicações estão as engrenagens, eixos, parafusos, buchas, rolamentos de rolos, pinos de pistão, diferenciais, entre outros.

## 2.8. Resultados e discussões

A seguir serão apresentados os resultados obtidos nos trabalhos encontrados na literatura. No presente trabalho é feita uma compilação e discussão sobre os resultados obtidos de alguns autores, relativamente quanto

ao uso do carbonato de cálcio e da influência da variação do tempo de tratamento na cementação sólida. Esses resultados serão mostrados através de gráficos e tabelas apresentadas pelos autores dos trabalhos que expõem os resultados obtidos. Na tabela 6 são apresentados os pesquisadores e as propriedades estudadas por cada trabalho.

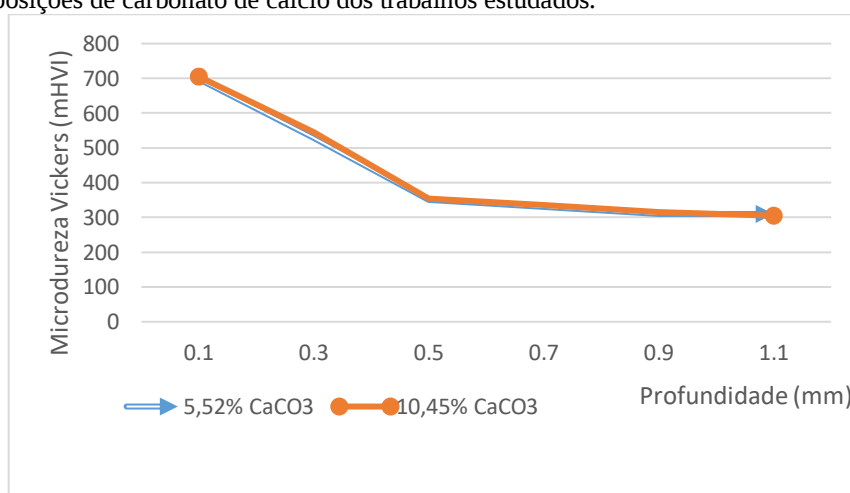
**Tabela 6.** Propriedades estudadas no processo [Autoria Própria].

| Pesquisador    | Propriedades estudadas                                                                    |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| BAUMGARTEN [5] | Microdureza Vickers; Profundidade efetiva de cementação; Teor de carbono; Microestrutura. |
| THAMMACHOT [6] | Composição química e microestrutura; Dureza; Energia de Impacto;                          |
| TORRES [7]     | Dureza.                                                                                   |
| HAFNI [8]      | Microestrutura; Dureza.                                                                   |
| HASSAN [9]     | Profundidade camada cementada; Dureza.                                                    |

Serão discutidas nesse trabalho as propriedades incrementadas pela cementação, com uso do ativador, quanto a dureza, profundidade da camada cementada e da sua microestrutura formada, relacionando suas influências nos resultados finais.

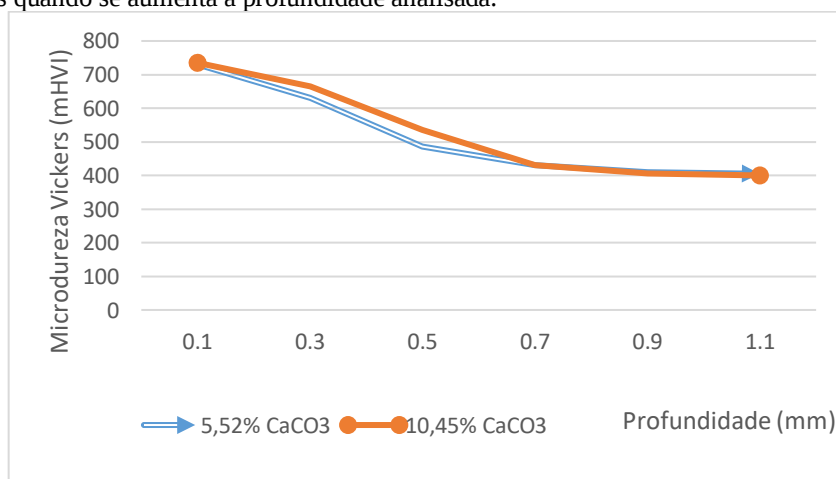
### 2.8.1. Dureza

Como já supracitado, a profundidade da camada cementada é medida, na pratica, através da dureza [1]. A seguir será exposto os valores de dureza e microdureza a partir de diferentes tempos de tratamento e com diferentes composições de carbonato de cálcio dos trabalhos estudados.



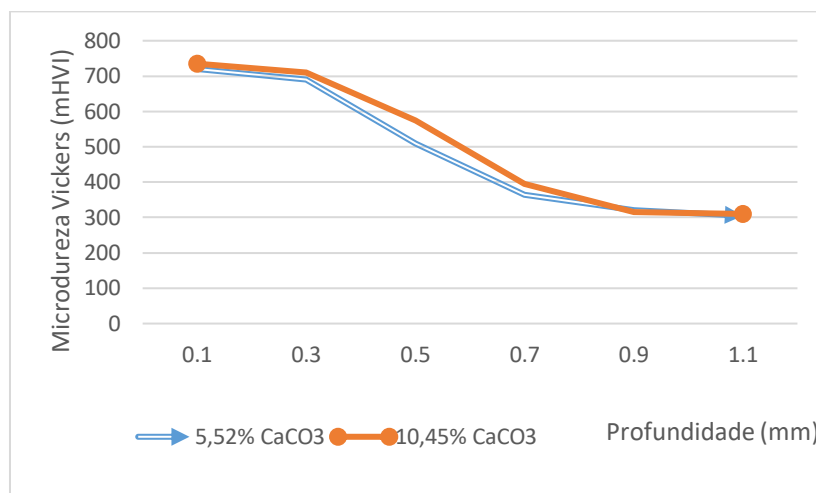
**Figura 3.** Cementação do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 870 °C, tempo 2 horas. Adaptado de [5]

A Figura 3 mostra que, para um baixo tempo de tratamento, variações na formulação do carbonato de cálcio não darão resultados diferentes. Isso se explica pelo pouco tempo na temperatura de cementação. A variação acontece apenas quando se aumenta a profundidade analisada.



**Figura 4.** Cementação do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 870 °C, tempo 4 horas. Adaptado de [5].

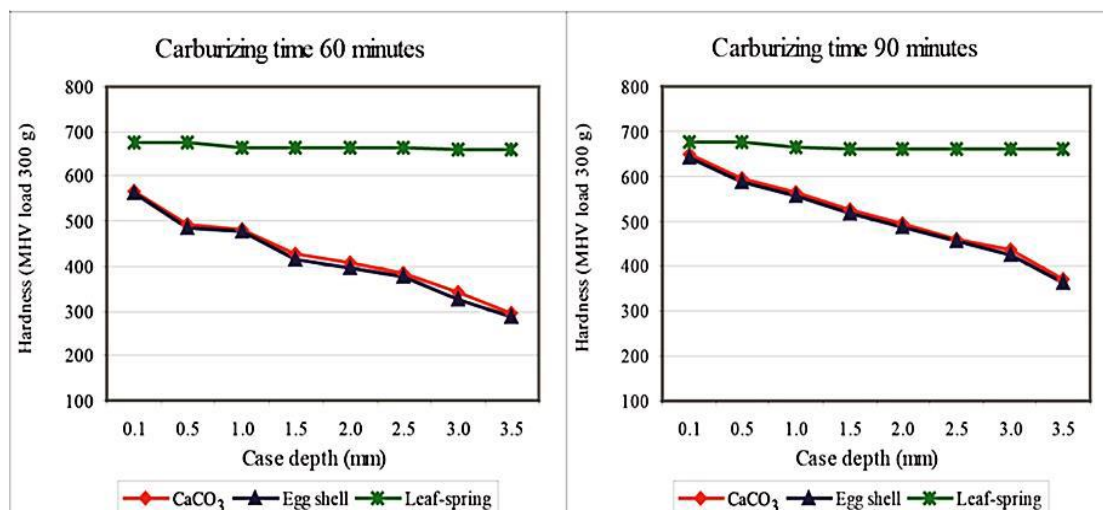
O incremento do tempo de cementação fez os valores de microdureza Vickers aumentarem consideravelmente em relação aos resultados da Figura 3. Assim como a formulação com maior porcentagem do ativador carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) resultou em resultados mais significativos que a formulação com menor porcentagem do ativador com o tempo de 2 horas.



**Figura 5.** Cementação do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 870 °C, tempo 8 horas. Adaptado de [5].

A Figura 5 nos mostra o aumento do valor da microdureza em relação ao tempo, que foi de 8 horas, e do uso do ativador carbonato de cálcio. Porém, é vista que um tempo excessivo de tratamento térmico na cementação sólida, pode causar prejuízos ao material, devido a diminuição do fornecimento do teor de carbono, do meio fornecedor de carbono, como mostra os resultados para maiores profundidades. Por isso, procura-se evitar tempos longos, que como já citado, causa o crescimento exagerado do grão austenítico e pode causar a oxidação do material.

O próximo trabalho analisado [6] analisou a influência de 2 ativadores para o processo de cementação sólida: o carbonato de cálcio comercial ( $\text{CaCO}_3$ ), a casca de ovo (que contém alta quantidade de  $\text{CaCO}_3$ ), em comparação com a dureza do feixe de molas (*Leaf-spring*) utilizado em automóveis. A Figura 6 mostra esses resultados de dureza em diferentes pontos da camada para uma temperatura de 900°C e diferentes tempos de tratamento.

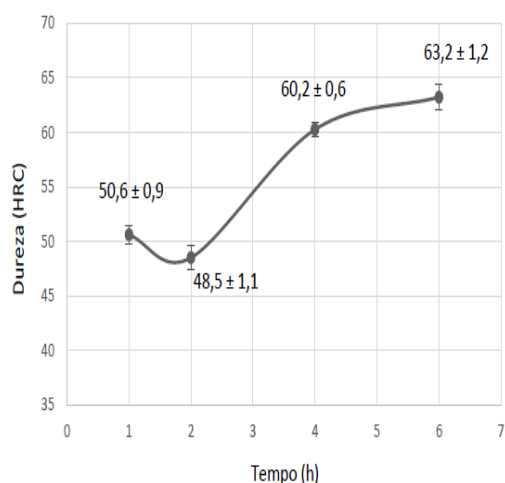


**Figura 6.** Cementação do aço AISI 1010, tratado a 900 °C [6].

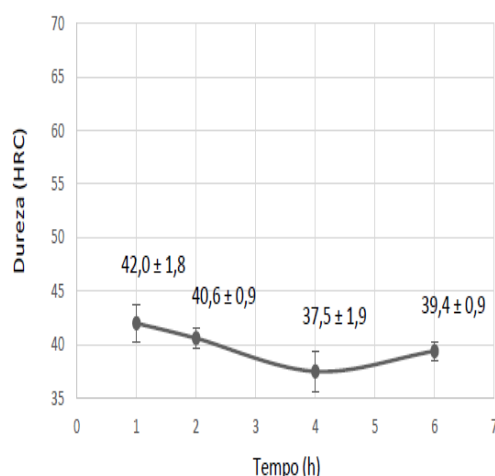
Como esperado, apesar do baixo tempo de cementação, o processo de cementação com 90 minutos de tratamento aumentou de forma mais eficiente a dureza do material em toda camada estudada, quando comparada aos resultados da cementação com 60 minutos de tratamento.

TORRES [7] variou as concentrações de carbonato de cálcio, mantendo a temperatura constante de 900°C para análise de dureza superficial de um aço SAE 8620. As composições foram de 9,1% e 13,1% em até 6 horas de tratamento. Inesperadamente, em comparação com os outros resultados, uma maior quantidade de  $\text{CaCO}_3$

resultou na diminuição da dureza, o autor não informou o motivo desse resultado. As Figuras 7 e 8 trazem os resultados encontrados para essas duas composições.

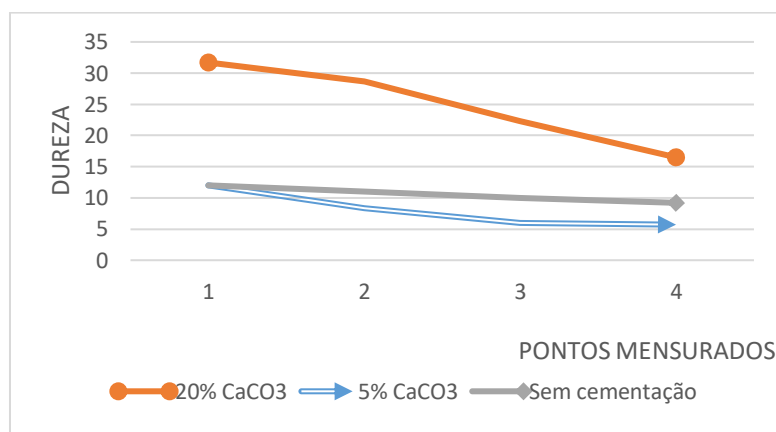


**Figura 7.** Dureza do aço SAE 8620 com 9,1% de  $\text{CaCO}_3$  [7].



**Figura 8.** Dureza do aço SAE 8620, com 13,1% de  $\text{CaCO}_3$  [7].

HAFNI [8] estudou a influência das composições do carbonato de cálcio sobre a dureza do material. Para isso, foram avaliadas 3 situações na dureza: tratamento de cementação com 5% de carbonato de cálcio, tratamento de cementação com 20% de carbonato de cálcio e sem tratamento de cementação. A Figura 9 nos mostra um gráfico com a influência dessa variável no processo. O autor não informou o aço utilizado, apenas especificou que era uma aço baixa liga.



**Figura 9.** Cementação de uma aço baixa liga tratado a 950 °C, tempo de 4 horas. Adaptado de [8].

Os resultados apresentados na Figura 9, demonstram a eficiência do ativador carbonato de cálcio no processo de cementação visando o aumento da dureza do material. Já que com a formulação de 20% do  $\text{CaCO}_3$  o material teve sua dureza aumentada em mais de 100% em relação ao material sem o processo de cementação. Porém, o uso do ativador na formulação de 5% causou uma diminuição na dureza do material, comparando os resultados da amostra sem cementação, como é visto nos pontos 2,3 e 4. Isso se dá ao fato do aquecimento do material e pela pouca presença do ativador, o que ocasionou a não difusão do material [8].

HASSAN [9] comparou as granulações de um tratamento de cementação com 10% de  $\text{CaCO}_3$  com um tratamento sem o uso do ativador. Foram feitas medições de microdureza Vickers nos materiais estudados. As indentações foram feitas de 0.25mm da borda com a diferença de diâmetro de 0.25 mm, após a coleta dos dados foi feita uma média e os resultados estão apresentados na Tabela 7.

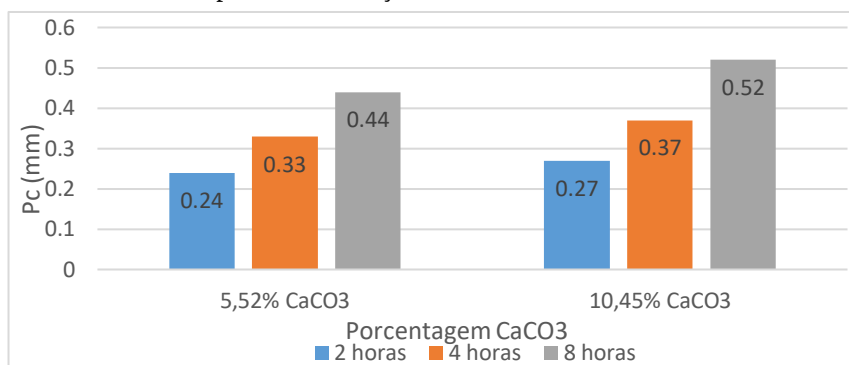
**Tabela 7.** Média da profundidade da camada cementada e dureza Vickers aço AISI 1020 [9].

| Tipo de tratamento  | Profundidade camada cementada (mm) | Dureza |
|---------------------|------------------------------------|--------|
| Sem uso de ativador | 1.1                                | 530    |
| 10% $\text{CaCO}_3$ | 1.3                                | 600    |

Como previsto, o uso do ativador, em porcentagem adequada, causou um incremento na dureza superficial do aço, bem como no resultado da profundidade da camada cementada. Sendo esses resultados esperados em relação aos outros resultados dos trabalhos analisados.

### 2.8.2. Profundidade da camada cementada

A seguir, é apresentada a influência dos fatores estudados na profundidade da camada cementada. A Figura 10 contém os valores determinados para a camada cementada, referente a profundidade efetiva de cementação ( $P_c$ ), que é o que caracteriza a eficácia dos processos de cementação, empregando diferentes composições de carbonato de cálcio e diferentes tempos de cementação.



**Figura 10.** Profundidade efetiva de cementação do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 870 °C. Adaptado de [5].

A Figura 10 demonstra a influência positiva para o crescimento dos valores de profundidade efetiva de cementação, com o aumento da formulação de carbonato de cálcio e do tempo de cementação. Esses resultados são avaliados como esperado, pois o ativador aumentou o potencial de carbono no meio difusivo.



**Figura 11.** Camada cementada do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 930 °C / 8 horas / 10,45%  $\text{CaCO}_3$  [5].



**Figura 12.** Camada cementada do aço SAE/ABNT 1020, tratado a 930 °C / 4 horas / 10,45%  $\text{CaCO}_3$  [5].

Das Figuras 11 e 12, todos os parâmetros foram mantidos constante, apenas o tempo foi variado, com isso se percebe a influência negativa do aumento excessivo do tempo de tratamento na camada cementada do aço SAE/ABNT 1020. Como já citado, essa influência negativa está relacionada com o aumento exagerado do grão austenítico.

HASSAN [9] utilizou um aço AISI 1020 tratado a 925°C por 2 horas de tratamento, utilizando 10% de  $\text{CaCO}_3$ , comparando esse processo de cementação sólida com o processo sem o uso do ativador. Os resultados da profundidade da camada cementada foram mostrados na Tabela 7. Como supracitado, o resultado encontrado

neste trabalho comprova a teoria da influência dessas variáveis no quesito da camada cementada, sendo coerente com os resultados encontrados na literatura científica.

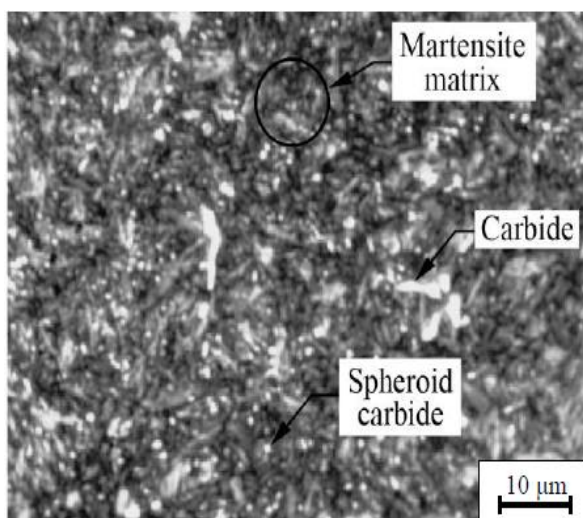
### 2.8.3. Microestrutura

A seguir são apresentadas as microestruturas resultantes dos processos de cementação resultantes da literatura científica, analisando a formação da camada de enriquecimento de carbono. Como a cementação é composta, normalmente, de duas etapas (primeiramente realiza-se o tratamento de difusão entre o carbono e o aço durante o tempo necessário para a obtenção da concentração do carbono desejada, e, posteriormente, e de forma opcional, realiza-se o tratamento térmico de têmpera) a sua estrutura é modificada. Todos os trabalhos analisados realizaram após a cementação o tratamento térmico de têmpera.

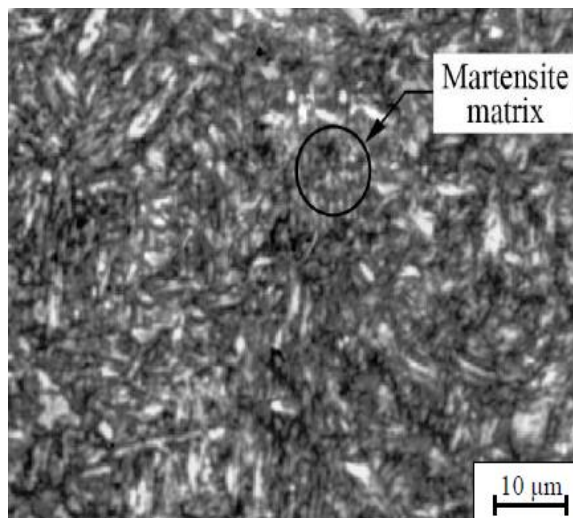
No trabalho do BAUMGARTEN [5] após a metalografia, a matriz na região de enriquecimento do carbono é a martensita para o aço SAE 8620, sendo considerada um resultado esperado para o processo de cementação seguida de resfriamento rápido em água ou óleo. Neste trabalho ainda se observou que não houve o aparecimento de austenita retida (parte da austenita que não se transformou em martensita durante a têmpera), o que é considerado positivo, pois evita a queda de dureza na região. Para o aço SAE 1020 a microestrutura não apresentou martensita, isso devido a sua baixa temperabilidade.

Na análise feita por THAMMACHOT [6] a microestrutura na posição de 0,5 mm com a formulação de  $\text{CaCO}_3$  consiste em uma matriz martensítica (Figura 13). Ainda é possível a visualização da cementita ou carbeto de ferro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) e cementita esferoidizada ou globulizada no aço tratado com o carbonato de cálcio, o que significa diminuição de dureza. Na posição de 2,0 mm é mantida a microestrutura martensita (Figura 14). Na posição de 5,0 mm, o pesquisador expõe que a microestrutura é formada por martensita e ferrita. Há uma grande quantidade de ferrita nessa região, isso é explicado pela baixa difusão de átomos de carbono.

HAFNI [8] demonstrou que a microestrutura formada no teste da formulação do aço com 20% de  $\text{CaCO}_3$  apresentou melhor difusão do carbono no material, isso pode ser observado pela formação da microestrutura martensítica após o processo de têmpera. Isso é um indicativo que houve um aumento de carbono no material de teste. A formação da martensita faz com que a superfície do material de teste se torne mais dura. Já a microestrutura formada no material de teste com uma formulação de 5%  $\text{CaCO}_3$  apresentou-se na forma de grãos finos de ferrita e perlita o que não aumentou muito a dureza do aço, comparada com a fase martensítica.



**Figura 13.** 0,5 mm de profundidade da camada cementada [6].



**Figura 14.** 2,0 mm de profundidade da camada cementada [6].

Toda essa análise mostra que após o processo de cementação a superfície do aço aumentou seus valores de dureza, resistência ao desgaste e fadiga, marcada pela presença da martensita, fase extremamente dura, vista os resultados encontrados nessa seção.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Relacionando o que foi abordado nas seções desse trabalho teórico com os resultados encontrados na literatura, foram alcançados os objetivos propostos: estudar a influência do tempo de tratamento na cementação sólida e do uso do carbonato de cálcio como ativador. Entre os resultados respondidos e encontrados se destacam:

- O aumento percentual da formulação do Carbonato de Cálcio, aumenta a capacidade de cementação, com a formulação adequada.

- 
- Um maior tempo de tratamento, elevou a capacidade de enriquecimento de carbono, consequentemente aumentando o potencial de cementação, isto pode ser observado pelos maiores valores da profundidade efetiva de cementação e dureza.
  - Um aumento exagerado do tempo pode causar prejuízos ao material, relacionado ao aumento excessivo do grão austenítico.
  - Na análise metalográfica, conforme literatura, foi percebida uma modificação estrutural causada pelo tratamento de cementação, que após o processo de têmpera, formou uma estrutura martensítica, caracterizada por ser extremamente dura.

Portanto, os resultados desse estudo foram esperados quando comparados aos resultados discutidos na seção do desenvolvimento da pesquisa. Apesar deste trabalho não estar preocupado em avaliar as causas dos resultados encontrados, mas apenas discuti-los, é destacado que vários componentes utilizados nas pesquisas podem conter impurezas e que estas podem ter influenciado no resultado final dos trabalhos.

Neste estudo teórico, os trabalhos analisados também variaram as temperaturas de cementação, o que não é buscado nesse trabalho. Fica a consideração da análise desse importante parâmetro para melhor compreensão de todo o aspecto da cementação sólida. Porém, esse parâmetro é bastante difundido e estudado. Logo, a influência do tempo e do uso do ativador é um campo mais escasso de pesquisa e que se precisa de mais estudos.

#### **4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. Aços e ligas especiais. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.
- [2] CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 7 ed. São Paulo: ABM, 2012.
- [3] CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- [4] FOREMAN, R. W. Pack Carburizing. ASM Handbook Vol. 4 - Heat Treating, 1991. p 325-328.
- [5] BAUMGARTEN, Júlio Frederico. Cementação sólida empregando granulado elaborado a partir de carvão vegetal reciclado e ativador de CaCO<sub>3</sub> ecologicamente correto. 2003. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia de Materiais e Processos Avançados, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2003.
- [6] THAMMACHOT, Narongsak. et al., The effects of energizer, carburizing temperature and time on the mechanical properties of hardened big knives in a pack carburizing process. Published by the Faculty of Engineering, Khon Kaen University, Thailand, 2016.
- [7] TORRES, Lucas de Almada. Cementação Sólida no Aço ABNT 8620 Utilizando Ferro Fundido como Fonte de Carbono e Carbonato de Cálcio como Ativador. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2017.
- [8] HAFNI, et al. The Influence of Calcium Carbonate Composition and Activated Carbon in Pack Carburizing Low Carbon Steel Process in The Review of Hardness and Micro Structure. IOP Conference Ser.: Earth Environ, 2017.
- [9] HASSAN, K. S. Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media. International Journal of Engineering & Technology, Science Publishing Corporation, 2015.
- [10] LIMA, Samantha Y. V. Estudo da cementação sólida e dos fatores que interferem no incremento da dureza do material e na profundidade da camada cementada. Monografia (graduação) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e Tecnologia, 2015.