

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DE MATERIAIS CEMENTADOS APLICADOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Igor dos Santos Roik, Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE, igorroik3@unifebe.edu.br

Eduardo Pessoa, Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE

Rodrigo Blödorn, Centro Universitário de Brusque - UNIFEBE

Resumo. A substituição de carros movidos a derivados do petróleo por carros elétricos é fundamental para a redução da emissão dos gases que corroboram com o efeito estufa. Entretanto, carros elétricos trabalham em maiores faixas de rotações e solicitam maior resistência mecânica de seus componentes. Para aumentar sua resistência, geralmente, os componentes são submetidos a processos que alteram suas características microestruturais. Estas alterações podem interferir na integridade superficial do material, podendo gerar efeitos indesejados nos componentes, por isso, sua medição é de extrema importância. Neste contexto, o presente trabalho visa desenvolver uma metodologia para avaliação da integridade superficial dos aços ABNT 1020 e DIN 16MnCr5 após processo de cementação. A avaliação da microdureza e da profundidade de camada cementada dos materiais foi baseada na norma ISO 2639:2002. Para aplicação do Método do Furo Cego (MFC) utilizou-se um centro de usinagem vertical ROMI D600 e uma fresa de topo reto de metal-duro como ferramenta de corte. Os resultados mostraram que o aço DIN 16MnCr5 apresentou maior camada cementada, atingindo profundidade 140 μm e microdureza de 814 HV 0,5, enquanto o ABNT 1020 atingiu profundidade de 50 μm e microdureza de 577 HV 0,5. Esta última ficou abaixo do esperado devido à presença de austenita retida, resultando em uma camada com maior tenacidade. Observou-se também que a aplicação do Método do Furo Cego (MFC) em materiais cementados resultou em furos com características dimensionais e geométricas que permitem a medição de tensão residual utilizando-se a técnica de fresamento orbital.

Palavras-chave: Integridade da superfície. Tensão residual. Método do Furo Cego.

1. INTRODUÇÃO

Automóveis elétricos já foram concorrentes dos automóveis movidos a derivados do petróleo em décadas passadas, entretanto perderam espaço devido à sua baixa autonomia e o baixo custo de seu concorrente (BARAN e LEGY, 2010).

Segundo Freitas (2012), os veículos elétricos podem reduzir a dependência do petróleo como meio de geração de energia, além disso podem reduzir a concentração de gases que corroboram com o efeito estufa. Em contrapartida, o desenvolvimento de componentes com alta resistência ao desgaste, sensibilidade a choques e resistência às forças de tração e compressão são as principais dificuldades encontradas na manufatura de componentes automotivos.

De acordo com Colpaert (1974), as propriedades mecânicas exigidas em cargas por fadiga, não são compatíveis em aços-carbono comuns, sendo necessário realizar processos metalúrgicos de endurecimento que alterem as propriedades da camada superficial. Um dos métodos utilizados para o endurecimento superficial dos aços é o processo chamado de cementação. Em peças que necessitam de alta resistência ao desgaste e à fadiga, como por exemplo pinhões e eixos, a cementação é comumente aplicada além disso, ao fim do processo, estes materiais apresentam uma microdureza superficial acima de 550 HV 1 (CRUZ, 2014).

Segundo Blödorn (2014), o conhecimento destas tensões é de extrema importância para a segurança e para prevenção de falhas. A medição de tensão residual pode ser feita de diversas formas, sendo a Difração de Raios-X e o Método do Furo Cego (MFC) as únicas técnicas normalizadas.

O presente trabalho é a parte inicial de um projeto de pesquisa que estudará a integridade da superfície de materiais cementados após processo de torneamento com ferramentas de PCBN. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia para analisar a integridade superficial dos aços ABNT 1020 e DIN 16MnCr5 após processo de cementação. Além disso, tem como objetivo específico, avaliar estratégias de usinagem para a aplicação do Método do Furo Cego em materiais cementados visando possibilitar a medição de tensão residual na continuação do projeto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços cementados

O processo de endurecimento do aço possibilita formar uma superfície com elevada dureza e resistente ao desgaste superficial, ao mesmo tempo que, mantém o núcleo da peça mais dúctil e tenaz. A junção destas propriedades no material é de grande valia em diversas aplicações, visto que o resultado desta combinação é um material capaz de suportar elevados níveis de solicitação mecânica (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Cruz (2014), o método mais utilizado para endurecimento superficial de aços é chamado de cementação. Este processo consiste na adição de carbono por difusão de átomos oriundos da atmosfera do forno.

Para que ocorra a adição de carbono no material é necessário que o aço seja aquecido a uma temperatura superior à zona de austenitização, que geralmente varia entre 850 e 950°C. Além disso, a profundidade de penetração do carbono está diretamente relacionada à temperatura e ao tempo de processo. Quanto mais tempo de cementação, maior será a penetração de carbono na superfície da peça e, consequentemente, maior será a profundidade da camada cementada (CHIAVERINI, 2008).

Depois da cementação, os aços são submetidos ao processo de têmpera seguido de revenimento, que tem como objetivo corrigir as características indesejadas formadas pelo processo de têmpera, como por exemplo, as tensões residuais geradas, corrigir a ductilidade do material e a dureza (CHIAVERINI, 2008).

2.2 Integridade da superfície

O estudo da integridade da superfície e suas características ganharam importância quando houve um aumento da demanda nos setores aeronáuticos, biomédico e automobilístico. Estes setores levantaram questões quanto ao nível de qualidade da superfície, confiabilidade e desempenho do componente (CAMPOS, 2016).

No processo de usinagem, por exemplo, praticamente toda energia mecânica é convertida em energia térmica. Dependendo do nível de energia desta conversão, podem ocorrer alterações microestruturais, trincas, redução ou aumento de dureza, formação de camada sobre revenida e gerar tensões residuais (CAMPOS, 2016).

2.3 Tensão residual

Tensões residuais são tensões presentes em componentes mesmo que na ausência de carregamento externo. Segundo Kapp (2010), tensões residuais são introduzidas em função do processo de manufatura, podendo gerar efeitos indesejados e desejados, dependendo dos requisitos de projeto. Estas tensões são geradas a partir de singularidades presentes no material, e a resultante das forças de tração e compressão são iguais a zero, mantendo o material em equilíbrio. Porém, com a aplicação de grandes esforços e com a retirada de material, algumas porções deformadas não retornam ao seu estado original devido à plastificação.

Um dos processos de manufatura com maior aplicabilidade é a usinagem, as operações de usinagem são a base da indústria metalmeccânica para a fabricação de componentes automotivos. É neste processo que o produto bruto se transforma, agrega valor e torna-se uma peça com responsabilidades funcionais (Cardoso, 2014). Farias (2019) complementa que a usinagem pode ter uma influência significativa no campo de tensão do material, por mais que as tensões geradas pela usinagem sejam superficiais e limitadas a uma pequena camada, elas podem impactar no desempenho funcional da peça.

2.4 Método do Furo Cego (MFC)

A medição de tensões residuais pode ser realizada por diferentes métodos experimentais ou físicos. Um dos métodos experimentais mais estudados e que vem sendo bastante utilizado na indústria é conhecido como Método do Furo Cego (MFC). O processo de usinagem do furo deve ser feito com extremo cuidado evitando-se a introdução de tensão residual em função da realização do mesmo. As principais fontes de incerteza no Método do Furo Cego (MFC) são: introdução de tensão pela usinagem do furo, imperfeições na forma e geometria do furo e o alinhamento da roseta óptica com relação ao furo (BLÖDORN, 2018).

O Método do Furo Cego (MFC) consiste na realização de um pequeno furo cego na superfície do material, a remoção deste volume de material localizado na peça faz com que ocorra uma redistribuição de tensão em torno do furo. Esta redistribuição causa deformações na superfície adjacente ao furo cego e, a partir destas deformações, com a utilização de extensômetros ou métodos ópticos, é possível determinar a tensão residual presente no material (SCHAJER e WHITEHEAD, 2017).

A geometria do furo deve possuir boa cilindridade, ser ortogonal à superfície e com fundo plano. Desta forma, aproximando-se com a geometria do modelo numérico utilizado para a determinação dos coeficientes de calibração (ASTM E837-13a, 2013).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos estudos foram utilizados os aços ABNT 1020 e o DIN 16MnCr5, que são amplamente aplicados pela indústria metalmeccânica. A utilização destes corrobora com a aproximação com as indústrias locais e com a grande gama de aplicação em componentes automotivos.

Estes aços divergem algumas propriedades mecânicas entre si. O aço ABNT 1020 apresenta baixa resistência mecânica e baixa usinabilidade, já o aço DIN 16MnCr5 apresenta uma média resistência mecânica, boa usinabilidade e é um aço indicado para o processo de cementação. A composição química de ambos é apresentada na Tab. (1).

Tabela 1. Composição química em %.

Material	C	Mn	P	S	Si	Cr
ABNT 1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,040	0,050	-	-
DIN 16MnCr5	0,14 - 0,19	1,00 - 1,30	0,035	0,035	0,40	0,80 - 1,10

Após a manufatura dos corpos de prova, seguiu-se para o processo de tratamento térmico, o qual foi realizado pela empresa ZEN S.A., que foi dividido em seis etapas, sendo respectivamente: lavagem de entrada, pré-aquecimento, tratamento (cementação), têmpera, lavagem de saída e, por fim, revenimento. Além disso, no forno foi aplicada uma atmosfera controlada com 1% de carbono e 1% de metano.

Para a realização da análise metalográfica, foi necessário cortar pequenas amostras provenientes dos corpos de prova. Posteriormente, foi realizado o processo de embutimento à quente sob pressão. Para isto, foi utilizada uma prensa de embutimento PRE-30Mi da marca Arotec. Após o embutimento, foi realizado o processo de pré-lixamento, neste, utilizou-se uma sequência gradativa de quatro lixas, sendo elas: 120, 320, 600, 1200 mesh. Além disso, em todas as lixas foi utilizada água como meio de refrigeração e a cada troca de lixa a amostra foi rotacionada em 90°.

Na sequência, realizou-se o polimento das amostras, para o qual, utilizou-se a politriz Aropol 2V-PU com uma velocidade de 600 rpm. Além disso, foi utilizado um pano de polimento com 200 mm de diâmetro e uma pasta de diamante como agente abrasivo. Por fim, realizou-se o processo de ataque químico. Como reagente químico utilizou-se nital 4% com 15 segundos de imersão e, após sua aplicação, a amostra foi limpa com uso de água corrente. Para a secagem foi utilizado o soprador térmico Black&Decker HG2000-B2.

Com as amostras preparadas, iniciou-se a análise metalográfica com intuito de visualizar as alterações microestruturais provenientes do processo de cementação. Para isto, utilizou-se o microscópio óptico BX51M da marca Olympus.

Posteriormente, foi realizada a medição da microdureza Vickers com a utilização do microdurômetro MV 1000B. Para a medição foi utilizada uma força de 4,9 N e 15 s como tempo de aplicação da pressão. Em cada amostra foram realizadas três colunas com quinze medições cada, totalizando quarenta e cinco aferições de microdureza Vickers. Além disso, visando definir o perfil de microdureza ao longo da profundidade da amostra, iniciou-se a medição na região da superfície (área cementada) seguindo em direção ao núcleo da peça.

Para definir a profundidade de camada cementada seguiu-se a norma ISO 2639:2002, a qual, define que a dureza característica da camada cementada deve estar acima de 550 HV aplicando uma carga de 4,9 N.

Para a realização do Método do Furo Cego (MFC) utilizou-se o centro de usinagem vertical ROMI D600. Este possui rotação máxima de 10 000 rpm e motor com potência de 15 kW. A usinagem do furo cego foi executada com uma fresa de topo reto de metal-duro à base de WC-Co, revestida de TiSN, com diâmetro de 1,0 mm e 4 gumes. Além disso, foi utilizada rotação de 9 900 rpm e avanço de 40 mm/min.

Para estes ensaios adotou-se a técnica FIO, onde foi realizado no primeiro incremento um furo em cheio com diâmetro de 1,0 mm e 0,05 mm de profundidade. Em seguida, no mesmo incremento, aumentou-se o diâmetro utilizando-se um avanço lateral de 0,1 mm até atingir o diâmetro final de 1,5 mm. Este processo repetiu-se 20 vezes até atingir a profundidade final de 1,0 mm.

Utilizou-se o microscópio de variação de foco ALICONA ® Infinite Focus G5, disponível no Núcleo de Tecnologia e Inovação em Fabricação (NTIF) da UNIFEBE, para a avaliação geométrica e dimensional dos furos, visando a medição de tensões residuais em trabalhos futuros. Segundo a norma ASTM E837.13a (2013), o furo cego necessita ter uma geometria de fundo plano e perpendicular à parede, conforme a geometria do modelo numérico para determinação dos coeficientes de calibração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a utilização do microscópio óptico foram geradas as imagens metalográficas dos aços ABNT 1020 e DIN 16MnCr5 antes e após a realização do processo de cementação. Tendo observado antes do processo de cementação a presença preferencial de ferrita, característica comum para o aço ABNT 1020. Notou-se também a presença de perlita em grãos desorganizados. Já para o aço DIN 16MnCr5, notou-se uma maior organização e uma tendência linear dos grãos de perlita.

Na medição da microdureza antes do processo de cementação, o aço DIN 16MnCr5, apresentou um valor mais elevado em sua superfície e reduziu conforme o aumento da profundidade. Este valor elevado nas camadas superficiais pode ter ocorrido pelo processo de corte realizado na manufatura do corpo de prova, o excesso de temperatura pode ter causado uma alteração microestrutural. Em contrapartida, o aço ABNT 1020 apresentou pouca variação ao longo de sua profundidade. Notou-se também uma variação média na ordem de 70 HV 0,5 entre os materiais. A presença de ligas metálicas no aço DIN 16MnCr5, como cromo e manganês, conferem ao aço uma característica de maior microdureza.

Após o processo de cementação, o perfil de microdureza foi aferido novamente e o resultado foi avaliado a partir da microdureza seguindo a norma ISO 2639:2002. Obteve-se, uma microdureza de 577 HV 0,5 para o aço ABNT 1020 e 814 HV 0,5 para o aço DIN 16MnCr5.

Em comparação com o estudo de Cruz (2014), a microdureza da camada cementada do aço DIN 16MnCr5 não teve o perfil de aumento inicial seguido de redução, o resultado apresentou uma queda constante da microdureza. Além disso, na microdureza do núcleo obteve-se o mesmo perfil, atingindo um valor de aproximadamente 400 HV 0,5.

Em contrapartida, no aço ABNT 1020, o resultado de microdureza ficou aproximadamente 300 HV 0,5 abaixo em comparação ao trabalho de Cruz (2014). Esta variação pode ter ocorrido pela maior presença de austenita retida na metalografia do material que, conforme Silva (1997), a formação desta gera uma camada com maior tenacidade, porém com menor dureza. Com relação à microdureza no núcleo, ambos apresentaram valores similares, atingindo aproximadamente 250 HV 0,5. Além disso, levando-se em consideração a temperatura e tempo de processo, esperava-se uma profundidade de camada cementada em torno de 75 μm , porém, atingiu-se 50 μm . Tanto esta variação como o valor reduzido da microdureza podem ter ocorrido devido a uma falha durante o processo de cementação. O não cumprimento do tempo estipulado para o processo, bem como uma variação na temperatura podem ter ocasionado estas características.

Na metalografia da região cementada de cada material notou-se a formação de martensita, além disso, houve a formação de austenita retida.

Na análise metalográfica de ambos os materiais foi possível observar a formação de três regiões distintas (Fig. 1). Uma camada superior mais escura, zona cementada (I), uma camada de difusão (II), que se refere a uma zona de transição entre a zona cementada e do núcleo do material e, por fim, o núcleo (III). Observa-se que a profundidade da camada cementada do aço DIN 16MnCr5 é maior quando comparada ao do aço ABNT 1020. Isto ocorre pela característica de boa temperabilidade do aço DIN 16MnCr5, que facilita a penetração de carbono na estrutura. Além disso, a presença de cromo na microestrutura tende a estabilizar a microdureza após o processo de revenimento.

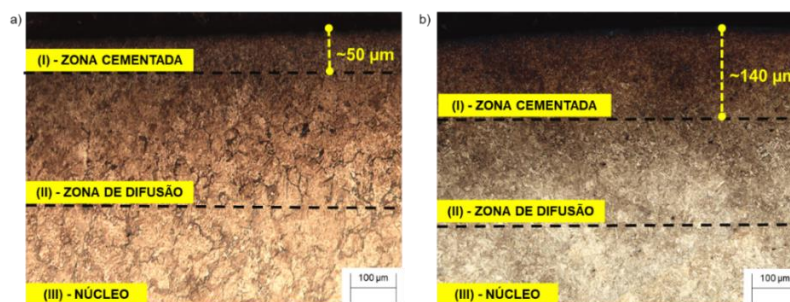


Figura 1. a) Microestrutura aço ABNT 1020; b) Microestrutura aço DIN 16MnCr5. Ataque nital 4%. Aumento de 50x.

Observou-se que os furos cegos produzidos para a medição de tensão residual apresentam diâmetro médio de 1,48 mm para o aço ABNT 1020 e 1,49 mm para o aço DIN 16MnCr5. Já a cilindricidade resultou em uma diferença maior entre os materiais, o furo cego produzido no aço DIN 16MnCr5 apresentou cilindricidade de 2,01 μm , enquanto o no aço ABNT 1020 resultou em 2,88 μm . Esta diferença pode estar relacionada à característica de usinabilidade dos materiais, visto que, o aço DIN 16MnCr5, apresenta vantagens em relação ao ABNT 1020. Além disso, um simples desalinhamento entre máquina e ferramenta pode ter afetado a geometria do furo.

A dureza elevada da superfície do aço DIN 16MnCr5 pode ter acarretado uma conformação na fase inicial do processo de usinagem do furo cego.

A Fig. (2) apresenta o perfil resultante, juntamente com a profundidade dos furos e o ângulo formado entre o fundo e a parede do furo cego.

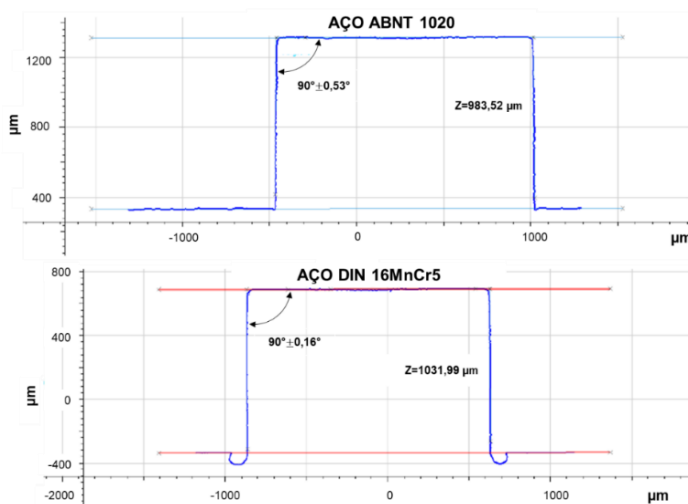


Figura 2. Perfil resultante, profundidade e o ângulo formado entre o fundo e a parede do furo.

Os resultados de profundidade atingidos, em ambos os furos, apresentaram pouca variação. No aço ABNT 1020 chegou-se em 983,52 μm , já no aço DIN 16MnCr5 chegou-se em 1031,99 μm . Além disso, as medições de perpendicularidade do furo resultaram em uma incerteza de $\pm 0,53^\circ$ para o ABNT 1020 e $\pm 0,16^\circ$ para o DIN 16MnCr5.

Desta forma, com os resultados encontrados, percebe-se que as geometrias dos furos, bem como suas dimensões, aproximam-se dos requisitos de aplicação da norma ASTM E837.13a (2013).

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados das análises da microestrutura e da microdureza, constatou-se que os aços ABNT 1020 e DIN 16MnCr5 apresentaram uma camada de cementação. O aço ABNT 1020 atingiu uma profundidade de camada de 50 μm , resultado 25 μm abaixo do esperado. Além disso, concluiu-se que a baixa microdureza está relacionada à presença de austenita retida na microestrutura do material. Já o aço DIN 16MnCr5 apresentou uma profundidade de camada cementada de 140 μm , valor condizente com o esperado.

Com relação ao Método do Furo Cego (MFC), os desvios de perpendicularidade dos furos resultaram em incertezas de medições de apenas $\pm 0,53^\circ$ e $\pm 0,16^\circ$, respectivamente para os aços ABNT 1020 e DIN 16MnCr5. Enquanto os desvios de cilindridade resultaram em 2,88 μm e 2,01 μm . Desta forma, conclui-se que o Método do Furo Cego (MFC) em materiais cementados é aplicável e apresenta bons resultados com relação à qualidade dimensional e geométrica do furo cego. Além disso, com os resultados obtidos será possível dar continuidade no projeto e realizar a medição de tensão residual.

6. REFERÊNCIAS

- BARAN, R.; LEGEY, L.F.L., 2010, Veículos Elétricos: uma História Recorrente. In: XIII Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro. Anais do XIII CBE. v. 2. p. 457-470.
- BLÖDORN, R., 2014 Estudo do Furo e Processo de Furação Empregado no Método do Furo Cego para Medição de Tensões Residuais. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BLÖDORN, R., 2018, Efeito do fresamento orbital com fresa de topo e furação em cheio com broca helicoidal sobre os valores medidos da tensão residual pelo “método do furo cego”. 2018. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CAMPOS, C.N. de, 2018, Análise da integridade da região abaixo da superfície no torneamento de materiais endurecidos com ferramentas de PCBN e metal-duro. 2016. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CARDOSO, M.J., 2014, Análise do processo de furação profunda no aço SAE 4144M endurecido utilizando MQL e broca helicoidal revestida.. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.
- CHIAVERINI, V., 2008, Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. 7. ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 599 p. ISBN 8586778486.
- COLPAERT, H., 1974, Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3.ed. São Paulo: Edgard Blücher. 412p.
- CRUZ, M.P.N., 2014, Efeito da composição química, da atmosfera cementante e dos ciclos termoquímicos na microestrutura e dureza de aços baixo carbono cementados e temperados. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- FARIAS, A. de, 2009, Análise de tensão residual e integridade superficial no processo de torneamento em material endurecido do aço ABNT 8620 cementado. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- FREITAS, J.C.N. de, 2012, Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos. 2012. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Eng. Mecânica, Universidade do Minho, Minho.
- KAPP, W.A., 2010, Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para medição de deslocamentos, deformações, tensões mecânicas e tensões residuais mecânicas. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- SCHAJER, G.S.; WHITEHEAD, P.S., 2018, Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses. Synthesis SEM Lectures On Experimental Mechanics, v. 1, n. 1, p. 1-186.
- SILVA, S.K.C., 2019, Análise da variação das propriedades microestruturais de um aço sae 1020 após tratamento de cementação em caixa. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.