

EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES POR INDUÇÃO EM CORPOS TUBULARES DE AÇO SAE 1215

Luiz Eloi Vieira Junior ⁽¹⁾ (levieira@furb.br), André Gustavo Schlindwein ⁽¹⁾ (andregs@hennings.com.br)

⁽¹⁾ Universidade Regional de Blumenau (FURB); Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Elétrica e Mecânica

RESUMO: *Aços resulfurados são empregados em processos de usinagem que demandam alta produtividade e boa resistência mecânica. No entanto, eventualmente o estado de recebimento encruado do material não é adequado para determinados processos de transformação como a conformação mecânica. O tratamento térmico de recozimento é aplicado quando existe a necessidade de restauração das propriedades originais do aço. Este trabalho visa identificar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões no aço SAE 1215. Corpos de prova do aço com geometria tubular foram usinados e submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões a fim de simular o processo produtivo da indústria. Através de ensaios mecânicos e metalográficos observou-se uma diminuição média de 38% na tensão limite de escoamento, uma diminuição média de 20% na tensão de resistência à tração máxima, um aumento médio de 185% no alongamento e alteração do modo de fratura frágil para modo de fratura dúctil.*

PALAVRAS-CHAVE: AÇO RESSULFURADO, AÇO SAE 1215, TRATAMENTO TÉRMICO, ALÍVIO DE TENSÕES, AQUECIMENTO INDUTIVO.

EFFECT OF INDUCTION STRESS RELIEF HEAT TREATMENT ON SAE 1215 TUBULAR STEEL BODIES

ABSTRACT: *Resulfurized steels are used in machining processes that demand high productivity and good mechanical resistance. However, eventually the hardened receiving state of the material is not suitable for certain transformation processes such as mechanical forming. Annealing heat treatment is applied when there is a need to restore the original properties of the steel. This work aims to identify the effect of stress relief heat treatment on SAE 1215 steel. Steel specimens with tubular geometry were machined and subjected to stress relief heat treatment in order to simulate the industry's production process. Through mechanical and metallographic tests, an average decrease of 38% in yield stress was observed, an average decrease of 20% in maximum tensile strength, an average increase of 185% in elongation and a change in the brittle fracture mode. for ductile fracture mode.*

KEYWORDS: FREE-CUTTING STEEL, SAE 1215 STEEL, HEAT TREATMENT, STRESS RELIEF, INDUCTION HEATING.

1. INTRODUÇÃO

O processo de usinagem na indústria metal mecânica é uma das operações que representam o maior custo dentro da cadeia produtiva (EVANGELISTA, 2007). Para reduzir este custo nas operações de usinagem, aços com alta usinabilidade são empregados em aplicações em que suas propriedades são adequadas. Entretanto, aços de alta usinabilidade nem sempre apresentam propriedades favoráveis a processos de fabricação posteriores, como por exemplo processos de conformação mecânica. Quando um aço sofre deformação plástica, ele é encruado e tem as suas propriedades físicas e mecânicas alteradas, que podem em alguns casos ser prejudicial para futuros processos de fabricação ou até mesmo para a aplicação do produto. Assim, uma das maneiras de restaurar as propriedades originais do aço após encruamento ou até mesmo diminuir os efeitos deste fenômeno é através do tratamento térmico de recozimento (COSTA E SILVA e MEI, 1988)

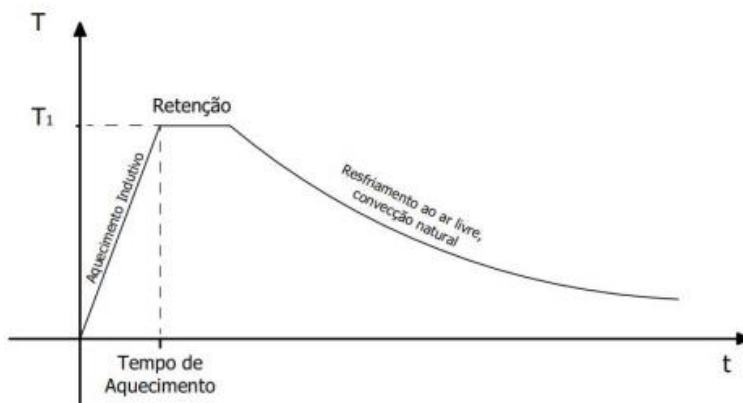
Em uma indústria localizada em Blumenau-SC são fabricadas conexões hidráulicas, mostradas na Figura 1 - Conexões Hidráulicas em aço SAE 1215. Figura 1, com geometria tubular usinadas a partir do aço SAE 1215 e que são posteriormente submetidas ao tratamento térmico de alívio de tensões, conforme ciclo térmico mostrado na Figura 2. O processo consiste em aquecer as peças rapidamente usando uma bobina de aquecimento indutivo, manter na temperatura de aquecimento por alguns segundos de acordo com o diâmetro aquecido e então resfriar as peças ao ar livre até atingir temperatura ambiente para posterior processo de conformação por dobramento.

FIGURA 1. Conexões Hidráulicas em aço SAE 1215.



Fonte: Parker Hannifin (2021).

FIGURA 2. Ciclo térmico para o tratamento de alívio de tensões



Fonte: Os autores (2024).

O tratamento térmico de alívio de tensões busca eliminar tensões resultantes do trabalho mecânico a frio pelo qual a peça passou até a sua geometria final, como por exemplo os processos de trefilação e de usinagem. No entanto, alguns autores tratam o tratamento de alívio de tensões para aço de baixo teor de carbono, o qual é usado no produto estudado, como desnecessário. Sendo o processo de tratamento térmico nesta aplicação um processo que não agrega valor ao produto e torna-se um gerador de custo, a aplicação desta etapa quando desnecessário pode diminuir a margem de lucro do produto vendido (CHIAVERINI, 1982) (COSTA E SILVA e MEI, 1988) (AHMAD et al, 2019), (ROBINSON et al, 2018), (MARTINS et al, 2018).

De maneira geral, dentro do processo produtivo, a operação de usinagem é uma das operações de maior custo, impactando diretamente o preço final de uma peça. Sendo assim, a escolha de um aço com alta usinabilidade é de grande interesse na indústria, visando a diminuição dos custos de produção através da diminuição do tempo de usinagem e desgaste de ferramentas.

Conceitualmente, a usinabilidade é uma das propriedades tecnológicas mais complexas dos materiais metálicos, definida como a facilidade com que um material pode ser cortado, de acordo com as dimensões, formas e acabamento superficiais requeridos comercialmente. O primeiro elemento químico utilizado como aditivo para melhorar a usinabilidade nos aços foi o enxofre (S) (EVANGELISTA, 2007). O enxofre tende a aumentar a fragilidade a quente dos aços como um resultado da formação de inclusões de sulfeto de ferro nos contornos de grão. Os fabricantes de aços eliminam essa fragilidade pela adição suficiente de manganês (Mn) no aço líquido para garantir a formação de inclusões de sulfeto de manganês. Assim, o enxofre está presente no aço principalmente como inclusões de sulfeto de manganês.

Como já mencionado, essas inclusões favorecem a usinabilidade pois causam a formação de um cavaco quebradiço e atuam como uma espécie de lubrificante sólido, impedindo a aderência do

cavaco a ferramenta e a destruição de seu gume cortante. Nessas condições, a máquina ferramenta é menos solicitada, o acabamento da peça é melhorado, além da velocidade de usinagem poder ser aumentada, as vezes duplicada em comparação com um aço comum não resulfurado.

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de esfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinados (CHIAVERINI, 1982). Especificamente, o tratamento térmico de Recozimento tem como finalidade de alcançar um ou mais dos vários seguintes objetivos:

- Remover tensões internas;
- Diminuir a dureza para melhorar a usinabilidade do aço;
- Alterar as propriedades mecânicas como resistência, ductilidade etc.
- Modificar os característicos elétricos e magnéticos;
- Ajustar o tamanho de grão;
- Regularizar a textura bruta de fusão;
- Remover gases;
- Produzir uma microestrutura definida;

As propriedades de um metal alteradas pelo trabalho a frio podem ser recuperadas ao estado original mediante ao processo de tratamento térmico de recozimento. À medida que se aumenta a temperatura, o estado encruado torna-se cada vez mais instável e a condição de elevada energia interna tende a desaparecer, permitindo o metal retornar à condição livre de energia, resultado na queda de dureza e removendo as tensões internas (CHIAVERINI, 1986). O processo de recozimento compreende três etapas, são elas a recuperação, recristalização e aumento do tamanho de grão:

- A etapa de recuperação tem como principal efeito o alívio das tensões internas, restaurando suas propriedades físicas alteradas sem que microestrutura do metal sofra qualquer modificação;
- Na etapa de recristalização, a densidade das discordâncias e propriedades relacionadas a resistência mecânica, como por exemplo a dureza, são reduzidas, já a ductilidade aumenta e as tensões internas decorrentes do trabalho a frio são totalmente eliminadas;
- Após o processo de recristalização se completar, caso a temperatura aumente, os grãos que agora são livres de tensões tendem a crescer. Um aumento excessivo de grãos pode afetar as propriedades mecânicas do metal, diminuindo sua resistência mecânica (CHIAVERINI, 1986)

O recozimento para alívio de tensões consiste em aquecer o aço em uma temperatura abaixo do limite inferior da zona crítica. O objetivo é aliviar as tensões originadas durante a solidificação ou produzidas em operações de transformação mecânica a frio, como a estampagem profunda. Normalmente o aquecimento do aço carbono na faixa de 600 a 680°C seguido de resfriamento a ar é suficiente. Em resumo, a temperatura de aquecimento deve ser a mínima compatível com o tipo e

as condições da peça, para que não se modifique sua estrutura interna, assim como não se produzam alterações sensíveis de suas propriedades mecânicas. As principais transformações que ocorrem neste tipo de recozimento são a recuperação e recristalização de fases encruadas.

O aquecimento por indução é um fenômeno provocado por indução eletromagnética geralmente através de bobinas de indução. As bobinas são alimentadas com corrente alternada que gera um campo eletromagnético a sua volta. Segundo o efeito Joule, uma peça metálica condutora ao ser exposta a este campo é aquecida pela circulação de correntes parasitas (CHIAVERINI, 1982). Máquinas de indução são amplamente usadas na indústria devido a sua versatilidade ao permitir o uso de diversos modelos de bobinas em uma única máquina. Uma das grandes vantagens deste tipo de equipamento é permitir o aquecimento localizado em uma determinada região de interesse da peça. Este tipo de equipamento permite através de sua programação atingir alto índice de repetibilidade, rapidez e homogeneidade no aquecimento das peças. Uma máquina de aquecimento indutivo comumente usada para tratamento térmico tende a ser automatizada e ter os seguintes fatores parametrizados para obter-se maior repetibilidade no processo:

- Potência e/ou temperatura;
- Tempo de aquecimento;
- Tempo de retenção ou patamar.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Produção dos corpos de prova

As conexões são usinadas a partir de barras trefiladas a frio de aço SAE 1215 com perfil redondo ou sextavado. Para o processo de usinagem, são utilizados tornos CNC. Após o processo de transformação da barra trefilada para a peça usinada, as peças são submetidas ao alívio de tensões em uma bobina de aquecimento indutivo. O alívio de tensões removerá as tensões causadas pelos processos de conformação a frio até então ocorridos, como a trefilação da barra e a usinagem. Esta etapa é necessária quando a peça é submetida a novos processos de conformação a frio, evitando sua ruptura durante o processo.

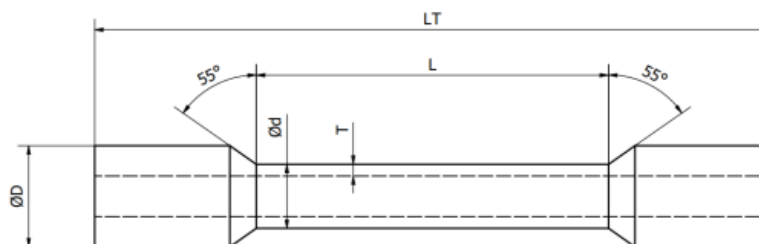
A matéria prima utilizada na fabricação dos corpos de prova foi a mesma que é utilizada na fabricação das peças em que o processo de tratamento de alívio de tensões é empregado, sendo o aço SAE 1215 em barra trefilada a frio, com composição química descrita na Tabela 1, conforme certificado de matéria prima do fornecedor. As dimensões e geometria dos corpos de prova estão representadas na Figura 3.

TABELA 1. Composição dos corpos de prova em SAE 1215.

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni
0,07	1,31	0,026	0,06	0,4	0,024	0,043	0,017

Fonte: Os autores (2024).

FIGURA 3. Dimensões dos corpos de prova.



Dimensões em milímetros

Ød	T	LT	L	ØD
8	2	150	60	15
14	2,5	150	60	20
19	3,5	200	104	30

Fonte: Os autores (2024).

Para realização dos experimentos, foram usinados no total 18 corpos de prova, sendo seis de cada tamanho, totalizando um número de três corpos de prova para cada tamanho e estado. Este número foi escolhido a fins estatísticos para gerar uma média das propriedades mecânicas medidas no material. A usinagem foi realizada com um centro de torneamento CNC (Mazak QTS 200, Japão), as tolerâncias de usinagem aplicadas foram $\pm 0,20\text{mm}$. As dimensões foram validadas utilizando um paquímetro digital Mitutoyo Absolute.

2.2. Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

Três corpos de prova de cada tamanho foram separados para serem submetidos ao tratamento térmico de alívio de tensões. Os corpos de prova separados foram aquecidos numa máquina indutiva do modelo JMMF 25kW (Jamo, Brasil) e então resfriados ao ar livre até temperatura ambiente, simulando o processo que é empregado no processo produtivo das peças. Em todos os corpos de prova, o aquecimento foi localizado na região do comprimento “L”, conforme mostrado na Figura 4. Os parâmetros utilizados na máquina de aquecimento indutivo para cada tamanho de corpo de prova são apresentados na Tabela 2, eles foram selecionados de acordo com o conhecimento detido pela empresa neste processo de tratamento. A temperatura foi medida por

meio de um termômetro digital infravermelho TD-979 (Icel, Brasil). Ao final do tratamento térmico, os corpos de prova foram identificados em ordem numérica de acordo com a Tabela 3.

FIGURA 4. Corpos de Prova como Recebido e Recozidos.



Fonte: Os autores (2024).

TABELA 2. Parametrização do aquecimento indutivo.

Ød (mm)	Estágio	Potência (%)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
8	Aquecimento	15	5,5	415
	Retenção	25	2,5	
14	Aquecimento	15	10,5	530
	Retenção	25	4,5	
19	Aquecimento	15	12,5	400
	Retenção	40	6,5	

Fonte: Os autores (2024).

2.3. Ensaios Mecânicos

Para medir a alteração das propriedades mecânicas causadas pelo tratamento térmico, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração em uma máquina universal de ensaios modelo Instron 300LX. O ensaio foi realizado em temperatura ambiente de 25°C, utilizando uma velocidade de deformação de 10mm/min (ASTM, 2001). A partir dos dados de limite de escoamento a 0,2% de deformação, limite de resistência a tração, deformação e das curvas tensão-deformação registrados pela máquina, foi possível realizar a comparação entre a resistência mecânica apresentadas pelos corpos de provas tratados e não tratados. O Alongamento do material foi obtido por meio da deformação axial do corpo de prova registrado pela máquina, aplicando a seguinte Equação:

$$\%Al = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde Al é o alongamento em %, Df é a deformação registrada pela máquina e L é o comprimento útil do corpo de prova.

TABELA 3. Identificação dos Corpos de Prova.

Condição	Ø Externo (mm)	Parede (mm)	Número CP
Recebido	8	2	1
			2
			3
	14	2,5	4
			5
			6
	19	3,5	7
			8
			9
Recozido	8	2	10
			11
			12
	14	2,5	13
			14
			15
	19	3,5	16
			17
			18

Fonte: Os autores (2024).

2.4. Preparação e Análise Microestrutural

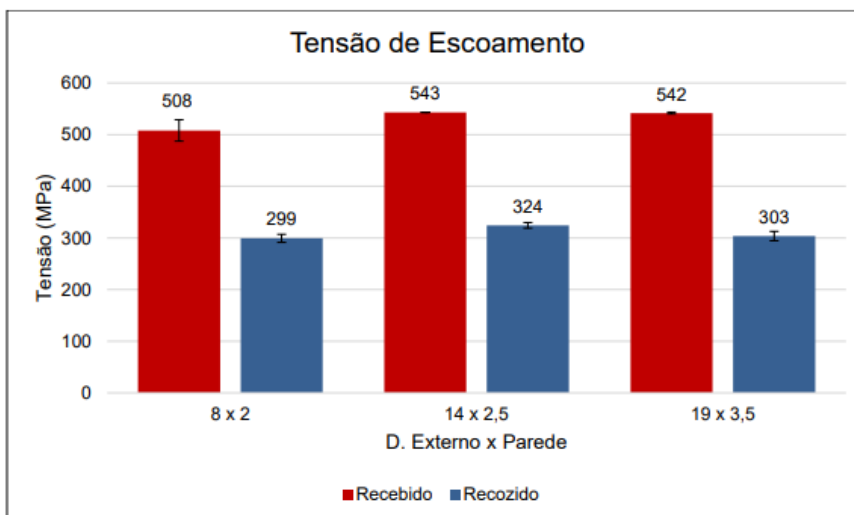
A observação da microestrutura do aço na condição de recebido foi realizada a partir da metodologia convencional de lixamento, polimento com suspensão aquosa de alumina 1,0 µm e ataque químico com Nital 2,0% (ABNT, 1995). As imagens foram obtidas cm auxílio um microscópio óptico Axio Scope A1 (Carl Zeiss, Alemanha). Os corpos de prova fraturados foram cortados na região da fratura em uma cortadeira metalográfica de disco abrasivo para realização das fractografias em um microscópio eletrônico de varredura VEJA 3 SEM (TESCAN, República Tcheca). As amostras passaram também pelo ensaio de espectroscopia no mesmo equipamento do ensaio de fractografia, utilizando um Módulo EDS (Espectroscopia por dispersão de energia de raios X) Modelo X-act (Oxford Instruments plc, Inglaterra).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através do ensaio de tração demonstram a alteração causada nas propriedades mecânicas dos corpos de prova decorrente do tratamento térmico de alívio de tensões. A máquina de ensaios registrou a deformação ocorrida durante o ensaio, a tensão limite de escoamento convencional a 0,2% de deformação e a tensão de limite de resistência à tração máxima.

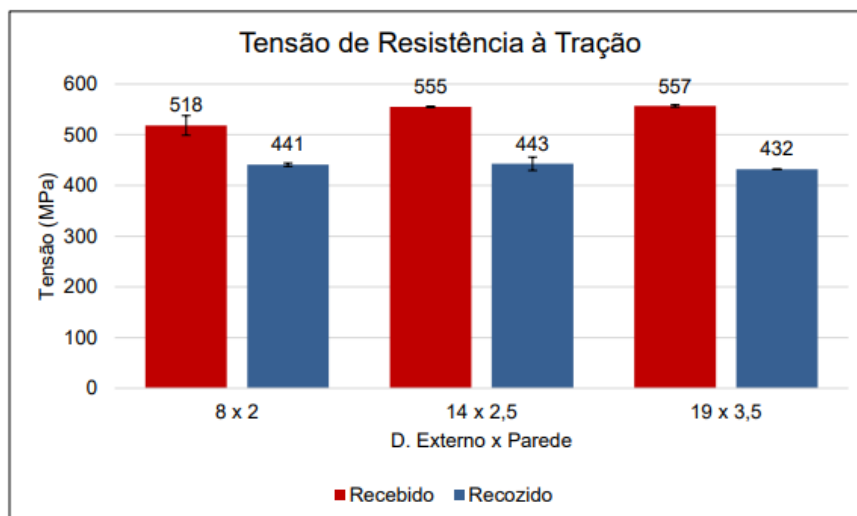
Nas Figuras 5, 6 e 7 respectivamente, são mostrados os valores alcançados as médias da tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência a tração e alongamento foram plotados, com diferenças consideráveis de redução das resistências e aumento dos seus alongamentos após o tratamento de alívio de tensões.

FIGURA 5. Valores obtidos de Tensão limite de escoamento para os corpos de prova antes e após a execução do tratamento de alívio de tensões.



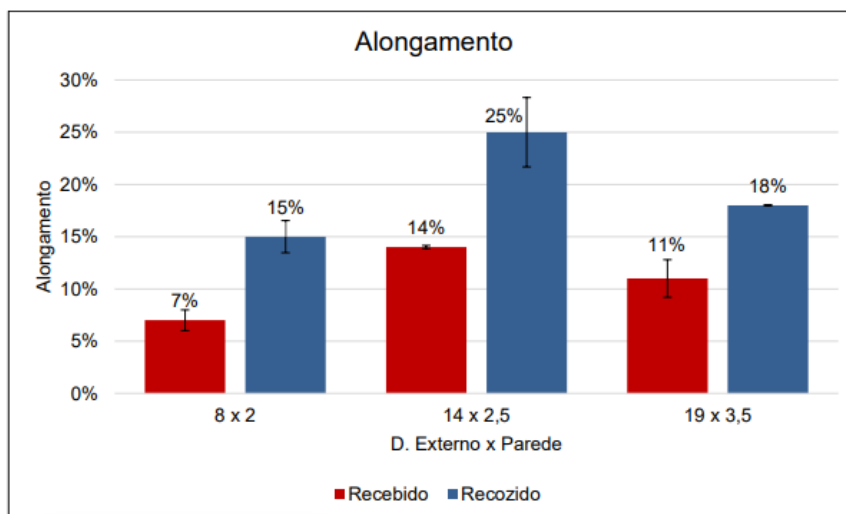
Fonte: Os autores (2024).

FIGURA 6. Valores obtidos de Resistência à Tração para os corpos de prova antes e após a execução do tratamento de alívio de tensões.



Fonte: Os autores (2024).

FIGURA 7. Valores obtidos de Alongamento para os corpos de prova antes e após a execução do tratamento de alívio de tensões.



Fonte: Os autores (2024).

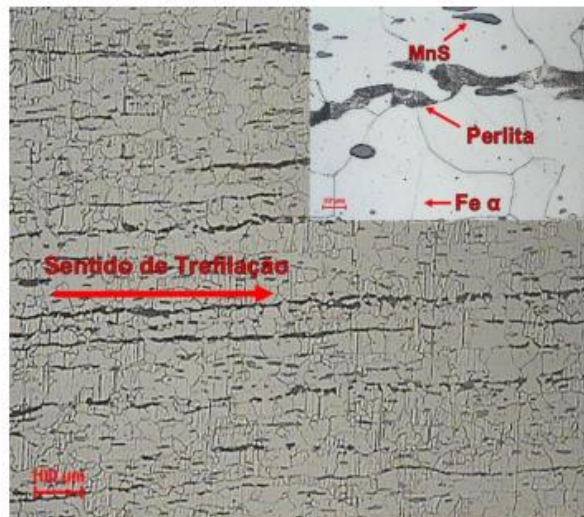
A medição da resistência mecânica dos corpos de prova apresenta maior limite de escoamento e limite de resistência a tração no material recebido, o que já era esperado visto que o material recebido se encontra no estado encruado e tende a apresentar uma alta densidade de discordâncias, resultando em uma maior resistência mecânica do material. No entanto, os corpos de prova que passaram pelo recozimento de alívio de tensões apresentaram uma diminuição homogênea na resistência mecânica dos corpos de prova, evidenciando a diminuição da densidade

de discordâncias que ocorre através do fenômeno de recuperação. A média da tensão limite de escoamento teve uma redução média de 38%, enquanto a média da tensão de resistência a tração apresentou uma redução média de 20%. Os corpos de prova de $\varnothing 8 \times 2,0$ apresentaram uma maior diferença na resistência mecânica medida em relação aos demais. Este maior desvio pode estar relacionado com a menor espessura de parede, que sofre variação decimal no processo de fabricação devido a vibração presente na usinagem, esta heterogeneidade na parede aumenta a probabilidade de concentração de tensão em pontos específicos do corpo de prova. No caso dos demais tamanhos a variação da parede é proporcionalmente menor, diminuindo este efeito e tornando os resultados mais homogêneos.

No caso do alongamento dos corpos de prova, os resultados evidenciam o aumento da ductilidade do material tratado, contudo, o experimento apresentou uma variação nos valores entre os três tamanhos de corpo de prova. Os corpos de prova de $\varnothing 8 \times 2,0$ apresentaram um aumento médio no alongamento de 215%, enquanto os corpos de prova de $\varnothing 14 \times 2,5$ mostram um aumento médio de 178% e os de $\varnothing 19 \text{ mm}$ um aumento médio de 163%. É notável o resultado superior de alongamento de 25% no corpo de prova de $\varnothing 14 \times 2,5$, que durante o tratamento foi submetido a uma faixa de temperatura mais alta que os corpos de prova de outros tamanhos, proporcionando uma maior eliminação de discordâncias. O aumento das médias do alongamento ocorrido após o tratamento nos diferentes tamanhos de corpo de prova se mostrou inversamente proporcionais com a espessura de parede de cada tamanho de corpo de prova. Esta relação mostra que a faixa de temperatura e tempo que os corpos de prova foram expostos é mais eficaz e produz um maior aumento na ductilidade dos corpos de provas menores de $\varnothing 8 \times 2,0$ e $\varnothing 14 \times 2,5$. O corpo de prova de $\varnothing 19 \times 3,5$ possui maior parede e portanto, demanda maior tempo de tratamento para a condução térmica provocar uma temperatura heterogênea ao longo da espessura, esta condição mostra que o tempo em que estes corpos de prova foram expostos não foi suficiente para uma eliminação de discordâncias tão grande quanto ocorrido nos demais tamanhos.

A micrografia apresentada na Figura 8 revela na microestrutura com fenômeno de fibramento mecânico, ou seja, com a orientação dos defeitos e das fases no sentido de conformação do material, característica resultante do processo de trefilação a frio da matéria prima. Na imagem é possível observar microestrutura predominantemente ferrítica, com lamelas de perlita presentes no contorno dos grãos ferríticos e inclusões de sulfeto de manganês, esta microestrutura é correspondente com a composição química do aço, que possui baixo teor de carbono e adições de enxofre (S) e manganês (Mn).

FIGURA 8. Microestrutura do Material Como Recebido com ampliação 100x e 1000x, Ataque Metalográfico: Nital 3,5%.

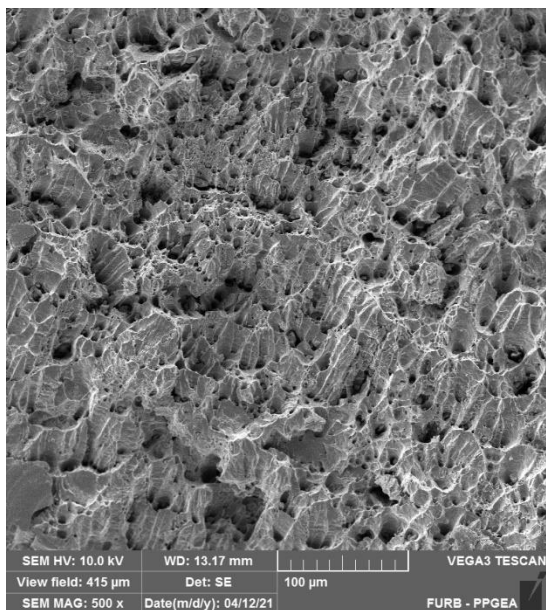


Fonte: Os autores (2024).

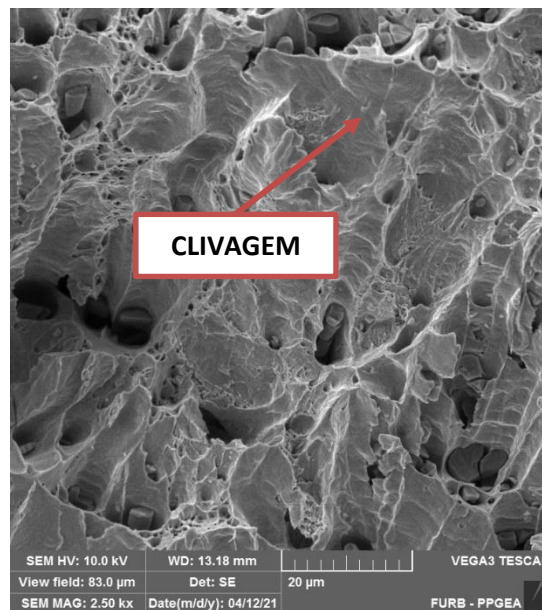
Após os ensaios de tração, os corpos de prova foram conduzidos ao Microscópio Eletrônico de Varredura Modelo VEJA 3 SEM (Tescan, República Tcheca) para observação das superfícies fraturadas. As imagens obtidas são apresentadas nas Figuras 9, 10 e 11 respectivamente. Em toda as imagens é possível notar a presença das inclusões de sulfetos de manganês, pertencentes a composição do aço. Essas inclusões resultam em cavidades que podem ser facilmente confundidas com as microcavidades formadas pelo ensaio de tração. Como os corpos de prova são fabricados com aço baixo carbono, em alguns casos mesmo aqueles que não foram recozidos apresentam microcavidades em sua fratura, sendo microcavidades indício de fratura dúctil por coalescimento de vazios, o que não é esperado visto que o material apresentou comportamento frágil (Fratura por clivagem) no ensaio de tração por estar encruado.

A Figura 11.b e Figura 11.d possibilitam de forma mais clara realizar a diferenciação dos modos de fratura. Enquanto a Figura 11.b, da amostra como recebido apresenta as características de uma fratura por clivagem, com faces lisas e marcas de rio, a Figura 11.d que foi recozida apresenta as características de uma fratura dúctil por coalescimento de vazios (Fratura alveolar), contendo uma superfície com diversas microcavidades esféricas nucleadas nas inclusões de sulfeto de manganês. Esta diferença no modo de fratura exibido entre os corpos de prova recebidos e recozidos mostram o efeito de ductilidade causado pelo tratamento térmico de alívio de tensões.

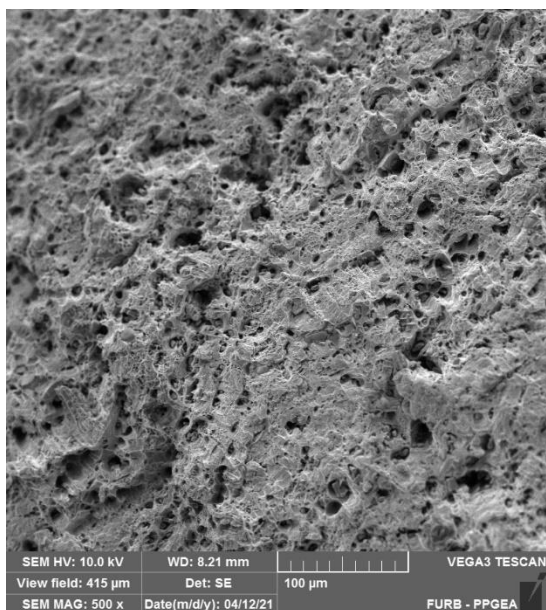
FIGURA 9. Fractografia obtida por MEV, tamanho 8x2,0. (a) e (b) CP 2 Recebido. (c) e (d) CP 13
Recozido Ataque Metalográfico: Nital 3,5%.



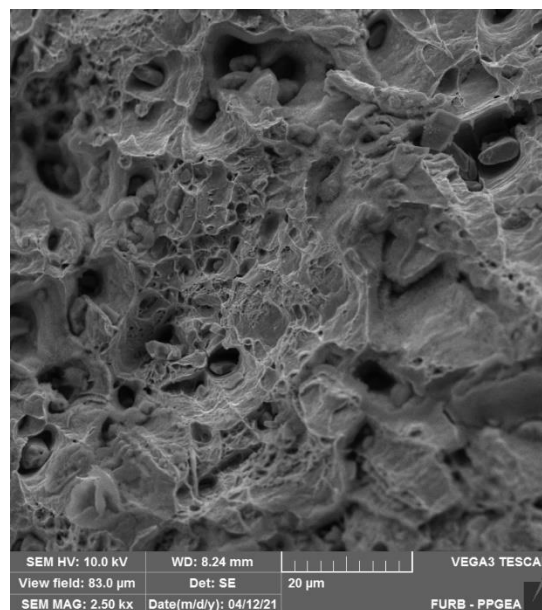
(a) 500x



(b) 2500x

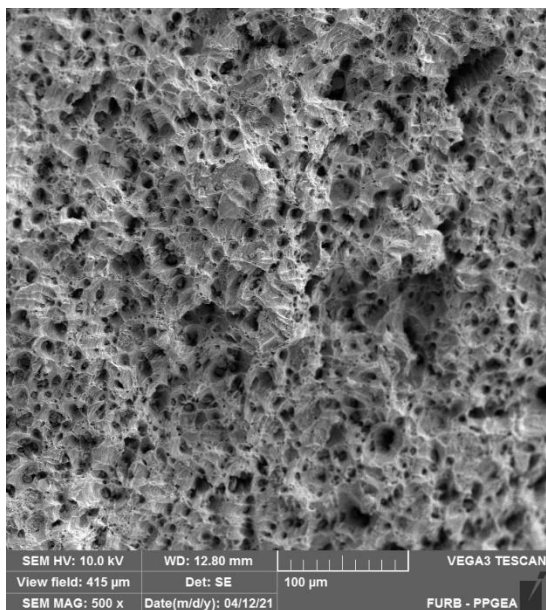


(c) 500x

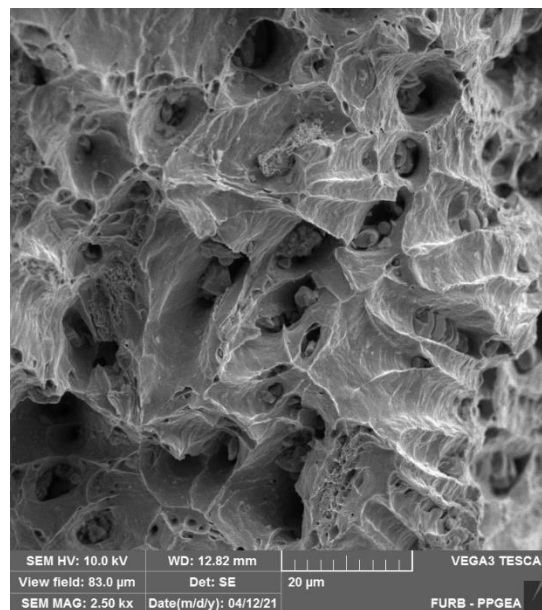


(d) 2500x

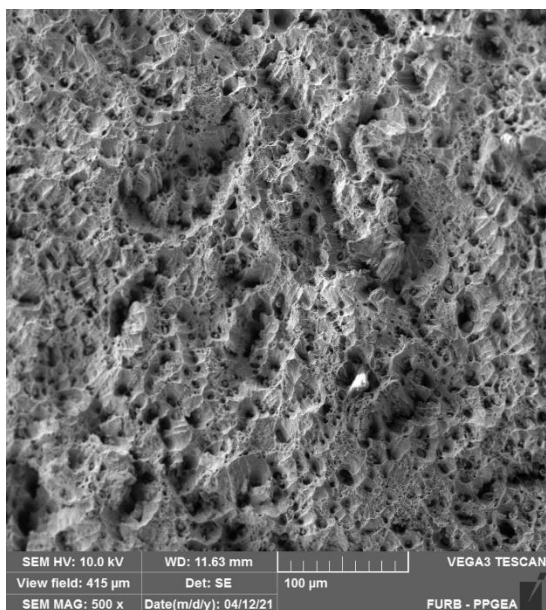
FIGURA 10. Fractografia obtida por MEV, tamanho 14x2,5. (a) e (b) CP 6 Recebido, (c) e (d) CP 18 Recozido. Ataque Metalográfico: Nital 3,5%.



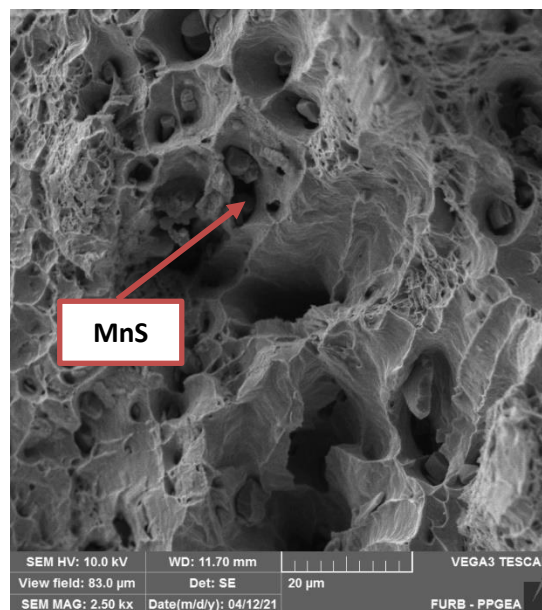
(a) 500x



(b) 2500x

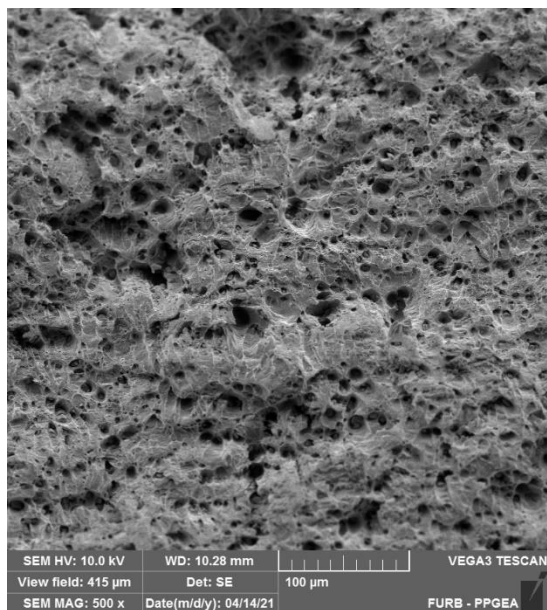


(c) 500x

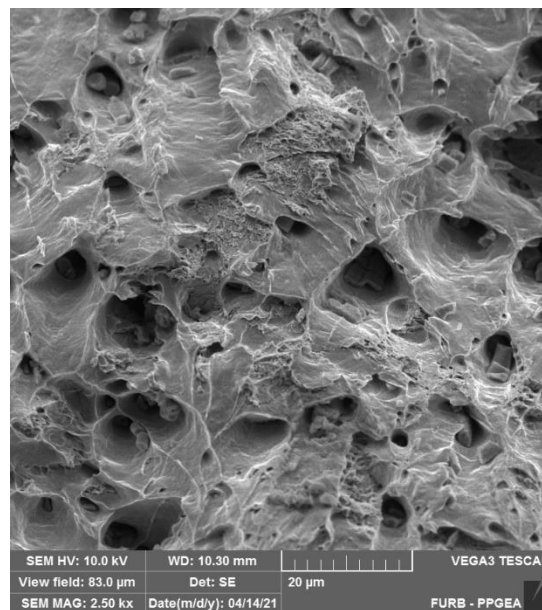


(d) 2500x

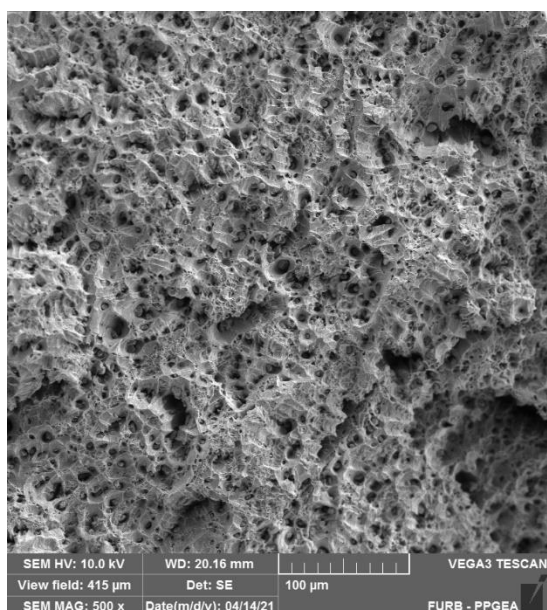
FIGURA 11. Fractografia obtida por MEV, tamanho 19x3,5. (a) e (b) CP 9 Recebido, (c) e (d) CP 21 Recozido. Ataque Metalográfico: Nital 3,5%.



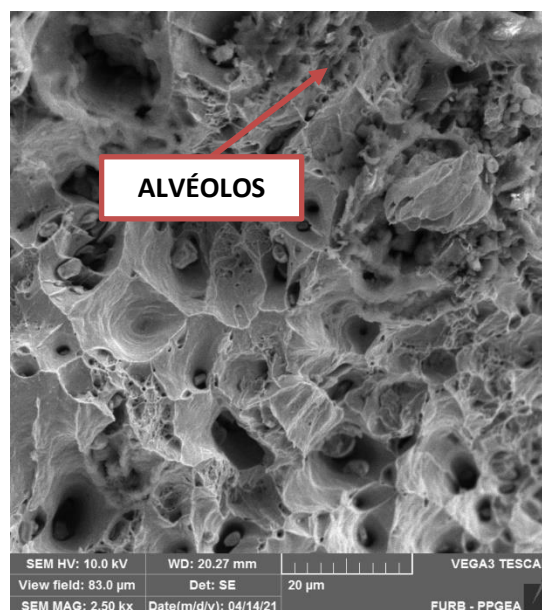
a) 500x



b) 2500x



c) 500x

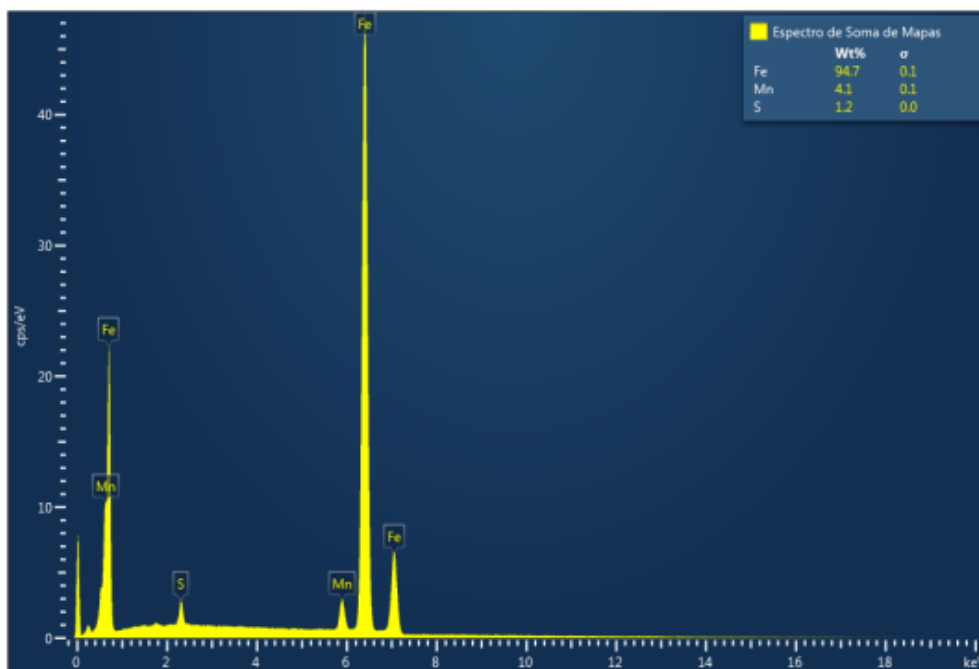


d) 2500x

Fonte: Os autores (2024).

No espectro obtido por EDS (Figura 12), é possível identificar os elementos presentes na região que sofreu varredura e mostra a quantidade percentual de cada elemento detectado na região analisada. Os elementos detectados pelo equipamento são o ferro, manganês e enxofre com respectivos pesos percentuais de 94,7%, 4,1% e 1,2%, o ensaio confirma a composição química esperada do aço SAE 1215.

FIGURA 12. Espectro de EDS.



Fonte: Os autores (2024).

4. CONCLUSÕES

Uma investigação sobre a influência do tratamento térmico de alívio de tensões na resistência mecânica do aço SAE 1215 trefilado a frio foi realizada. Assim, algumas considerações devem ser feitas. Sendo elas:

1. Os ensaios de tração mostraram redução na resistência mecânica e aumento do alongamento para todas as amostras, indicando um processo de amolecimento local dos corpos de prova devido ao processo de aquecimento que provocou o fenômeno de recuperação e consequente diminuição da densidade de discordâncias presente no material. O alongamento nos corpos de prova de $\varnothing 8 \times 2,0$, $\varnothing 14 \times 2,5$ e $\varnothing 19 \times 3,5$ aumentaram 215%, 178% e 163%, respectivamente;

2. A espessura dos corpos de prova influenciou na resistência à tração. Os corpos de prova com espessura de parede de 2,0 mm apresentaram menores valores. Isso pode ser atribuído ao processo de usinagem e furação para obtenção dos corpos de prova. Em usinagens em que o comprimento de furação é muito maior que o diâmetro do furo, o fenômeno de flambagem da broca tende a provocar uma variação do diâmetro de furação e consequentemente variação da parede do corpo de prova, causando potenciais concentradores de tensão nos locais em que a parede é reduzida e consequentemente antecipando a fratura do material;

3. As micrografias das superfícies de fraturas permitiram observar alterações nos modos de fraturas nas condições recebidas (encruadas) e tratadas termicamente. Os corpos de prova do

material em condição encruada apresentaram uma combinação de modo de fratura por coalescimento de vazios e fratura por clivagem, sendo mais evidente a fratura frágil por clivagem no corpo de prova de Ø19x3,5 que apresentou menor ductilidade no ensaio mecânico. Já os corpos de prova que sofreram o tratamento térmico de alívio de tensões apresentaram características de fratura por coalescimento de vazios nucleadas nas inclusões não metálicas presentes no aço, sendo este modo de fratura característico de fratura dúctil;

4. Apesar da isenção do tratamento térmico de alívio de tensões apresentar uma redução no custo de fabricação do material, as peças que não são tratadas permanecem em estado encruado como recebido e, portanto, não apresentam uma conformabilidade tão alta quanto as peças tratadas termicamente, limitando assim as possibilidades geométricas de conformação no projeto do produto. Esta opção pode se tornar viável em condições na qual o material não demanda um alto grau de conformação mecânica.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. S.; YUNXIN, W.; HAI, G.; LEI, L. Determination of the Effect of Cold Working Compression on Residual Stress Reduction in Quenched Aluminium Alloy 2219 Block. *Journal of Mechanical Engineering*, v. 65, p. 311-318, 2019

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E8M01A. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Philadelphia, Metric, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13284: Preparação de corpos de prova para análise metalográfica. Rio de Janeiro, ABNT, 1995. CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 5ª. ed. São Paulo: ABM, 1982.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica: Estruturas e propriedades das ligas metálicas. 2ª. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COSTA E SILVA, A. L.; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. 2ª. ed. São Paulo: Eletrometal S.A. Metais Especiais, 1988.

EVANGELISTA, L. N. Usinabilidade do aço de corte-fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 com diferentes níveis de elementos químicos residuais (cromo, níquel e cobre). Tese de Doutorado. Uberlândia: Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. 2007.

MARTINS, C.A.P.; MORILLA, J.C.; MARQUES, P.V.; DELIJAICOV, S. Alívio de tensões por vibrações subressonantes: análise e parametrização. *Revista Matéria*, v.23, 2018.

PARKER HANNIFIN. Disponível em: <<https://ph.parker.com/us/en/hose-fittings>>. Acesso em: 14 março 2021.

ROBINSON, J. S.; WIMPORY, R. C.; TANNER, D. A.; MOONEY, B.; TRUMAN, C. E.; PANZNER, T. Cold compression of 7075 and factors influencing stress relief. *Materials Performance and Characterization*, v. 7, p. 898-911, 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Hennings Vedações Hidráulicas Ltda pela doação dos materiais utilizados neste trabalho e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – FURB pelas análises microestruturais e ao Laboratório de Conformação Mecânica – UFSC pela realização dos ensaios mecânicos.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.