

AVALIAÇÃO DA REFUSÃO DE AÇOS 1Cr-Mo-V FORJADOS PARA ROTORES DE TURBINAS A VAPOR*

Gabriella Cruz dos Santos Roza¹
Luiz Henrique de Almeida²
Bruno Reis Cardoso³
Leonardo Sales Araujo⁴

Resumo

Os aços 1Cr-Mo-V forjados são largamente utilizados em rotores de turbinas a vapor, e o seu desempenho em condições de fluência vem sendo melhorado por tecnologias de fabricação. Sendo assim, os fatores metalúrgicos que afetam o comportamento em fluência dessa classe de material vem sendo estudados. O objetivo deste trabalho foi avaliar as diferenças na microestrutura e nas propriedades mecânicas, a temperatura ambiente, entre amostras de aço 1Cr-Mo-V fundidas em forno elétrico aberto e amostras que posteriormente foram refundidas no forno a arco elétrico a vácuo (VAR). As amostras foram forjadas a quente e tratadas termicamente em mesmas condições. Para a avaliação das diferenças, foram comparadas as microestruturas nas duas condições e feitas análises de inclusões através de microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Foram realizados ensaios de dureza e de tração a temperatura ambiente. Os resultados mostraram que a refusão foi eficiente na redução do teor de alguns elementos deletérios e na redução do tamanho e do número de inclusões, sulfetos de manganês e silicatos de manganês, além de contribuir para uma distribuição mais homogênea tanto das inclusões como da microestrutura bainítica apresentada. As medidas de propriedades mecânicas a temperatura ambiente não mostraram alterações significativas na resistência. Porém, houve aumento na ductilidade, manifestado por uma maior redução de área.

Palavras-chave: Aço 1Cr-Mo-V forjado; Refusão à arco em vácuo (VAR); Análise microestrutural; Turbinas a vapor.

EVALUATION OF REMELTING IN 1Cr-Mo-V STEEL FORGINGS FOR STEAM TURBINE ROTORS

Abstract

The 1Cr-Mo-V forging steels are widely used in the manufacture of steam turbine rotors, and its performance under creep conditions has been improved by the development of manufacturing technologies. Thus, metallurgical factors affecting the creep behavior of this class of materials have been widely studied. The objective of this work was to evaluate the differences in the microstructure and mechanical properties, at room temperature, between 1Cr-Mo-V steel samples that were melted in open electric furnace and samples that were subsequently remelted in vacuum arc furnace (VAR). The two samples were hot forged and heat treated under the same conditions. For the evaluation, the microstructures were compared between both conditions. The analysis of inclusions was made by optical and scanning electron microscopy. Additionally, hardness and tensile tests were conducted at room temperature. The results showed that the remelting was effective in reducing the content of some deleterious elements and the size and number of inclusions, characterized as manganese sulphides and manganese silicates; and contributed to a more homogeneous distribution of both inclusions and the bainitic microstructure presented. The strength in ambient temperature presented no significant alterations between the samples. However, it was observed an increase in the ductility, manifested in a higher reduction of area.

Keywords: 1Cr-Mo-V forging steels; Vacuum arc remelting (VAR); Microstructural evaluation; Steam turbines.

¹ Eng. de Materiais, Eng., Bolsista, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Metalúrgico, D.Sc, Professor, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

³ Eng. Metalúrgico, M.Sc, Pesquisador, Depto. de Tecnologias Especiais, Cepel, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

⁴ Eng. Metalúrgico, D.Sc, Professor, Depto. de Eng. Metalúrgica e de Materiais, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços 1Cr-Mo-V forjados vem sendo utilizados para fabricação de rotores de turbinas a vapor desde a década de 1950. Desde então, vem sendo desenvolvidas tecnologias para o uso destes aços na fabricação de turbinas de grande porte. O desempenho dos rotores de turbina foi melhorado pelo desenvolvimento de tecnologias de fabricação de peças forjadas de alta pureza.

As condições de produção e os ciclos de tratamentos térmicos são cruciais para se maximizar as condições de operação e a resistência à fluência do aço, já que podem ocorrer importantes mudanças na microestrutura nessas condições. Com isso, essas mudanças e os fatores que afetam o comportamento do material em fluência vem sendo largamente estudados.

A condição ideal para a produção de tais aços está diretamente ligada a etapa de fusão do aço. O desenvolvimento de fornos a vácuo tornou possível a produção de aços de alta pureza, e a implantação do método de fusão secundária garantiu melhor qualidade dos aços para rotor forjado com uma maior homogeneidade de composição e estrutura de solidificação uniforme. Dentre esses métodos está a refusão por arco elétrico em vácuo (VAR), que possibilita produzir ligas compostas por elementos reativos e reduzir elementos deletérios às propriedades [1,2].

O objetivo deste trabalho foi avaliar as diferenças na microestrutura e nas propriedades mecânicas a temperatura ambiente entre amostras de aço 1Cr-Mo-V que foram fundidas apenas em forno elétrico aberto e amostras que, posteriormente, foram refundidas no forno a arco elétrico a vácuo da COPPE/UFRJ. Em ambos os casos, as amostras foram posteriormente forjadas a quente em barras de perfil quadrado, tratadas termicamente por dupla normalização e revenido, condições estas que são as mesmas usadas na fabricação dos rotores 1Cr-Mo-V forjados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material

O material utilizado para realização deste trabalho consiste em um aço 1Cr-1Mo-0,25V (1Cr-Mo-V) para fabricação de rotores forjados de turbinas a vapor. As especificações de fabricação do material seguiram a norma ASTM A470/A470M Grau D Classe 8 [4].

2.2 Fabricação e Refusão dos Eletrodos

A primeira etapa consistiu na fabricação de oito eletrodos do aço, com 60mm de diâmetro e 910mm de comprimento. Os eletrodos foram obtidos através de fusão em forno elétrico aberto por indução eletromagnética e foram previamente preparados para o processo de refusão.

A Refusão foi realizada nas instalações do Laboratório Multiusuário de Fusão a Arco da COPPE/UFRJ, no forno de refusão a arco em vácuo, modelo L200 da empresa *ALD Vacuum Technologies*.

Durante o processo de refusão no VAR são controladas a corrente de fusão, voltagem, pressão de vácuo e corrente de bobina indutora. A Figura 1 mostra o exemplo de uma curva de acompanhamento do processo de fusão. A corrente de fusão usada foi de cerca de 2 kA, com voltagem em torno de 23 V e pressão de vácuo em torno de 0,02 mBar.

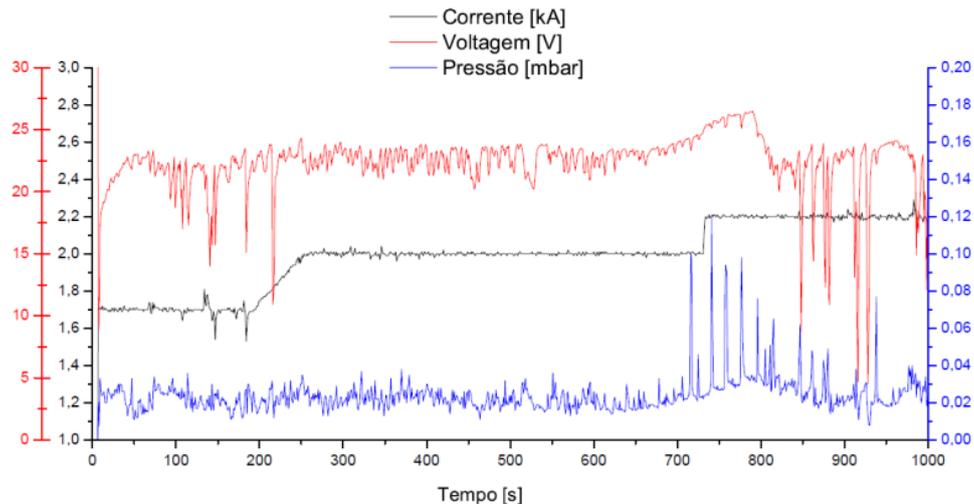


Figura 1. Gráfico mostrando as variações de corrente, voltagem e pressão durante o processo de refusão de um dos eletrodos.

Os lingotes produzidos foram forjados a quente em barras de perfil quadrado com aproximadamente 35mm de lado. Após o forjamento, as barras passaram por tratamento térmico duplo de normalização e revenido, como indicado na norma ASTM A470/A470M [4]. As condições dos tratamentos térmicos estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições dos tratamentos térmicos realizados no Eletrodo E4 e nos Lingotes

Primeira Normalização	980°C / 3 horas de patamar / resfriamento ao ar calmo
Segunda Normalização	920°C / 3 horas de patamar / resfriamento ao ar calmo
Revenimento	700°C / 4 horas de patamar / resfriamento no interior do forno

2.3 Análise Química

A determinação dos elementos químicos foi realizada nos eletrodo E4 e lingote L4, efetuados no Laboratório de Análises Químicas do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) utilizando-se os seguintes métodos analíticos:

- Carbono e enxofre - Combustão direta (infravermelho);
- Silício - Gravimetria e absorção atômica;
- Fósforo - Volumetria (hidróxido de sódio-acidimetria);
- Manganês, molibdênio, alumínio, cromo, níquel e vanádio - Espectrofotometria de absorção atômica;

Os Equipamentos utilizados no ensaio foram um Analisador de carbono e enxofre LECO CS300/HF300, um Espectrofotômetro de absorção atômica VARIAN AAS 220, e uma Balança Analítica METTLER AE 240.

2.4 Caracterização Microestrutural

Assim como a análise química, toda a caracterização microestrutural e mecânica foi realizada nos laboratórios do Cepel. Para a preparação metalográfica, foram cortadas 2 amostras da barra oriunda de um lingote refundido (identificado como L4) e 2 amostras da sobra do eletrodo (identificada como E4). As amostras foram embutidas a quente, para observação das faces longitudinal transversal

(identificadas como E4-L, E4-T, L4-L, L4-T). As mesmas foram lixadas lixas 120, 220, 320, 400 e 600 *mesh* e polidas com diamante de 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m.

Após o preparo das superfícies, as amostras (sem ataque metalográfico) foram observadas e fotografadas em microscópio ótico (MO) Olympus GX 71, para analisar e comparar a distribuição das inclusões nas amostras E4 e L4. Após a obtenção das imagens necessárias, foram atacadas utilizando o reagente Vilela. Em seguida, as amostras foram fotografadas por MO.

Para a observação da microestrutura e para avaliação da distribuição das inclusões presentes através do MEV, foi utilizado o equipamento ZEISS modelo EVO40. As observações e o registro de imagens foram realizadas com voltagem de aceleração de 20kV, em modo de elétrons secundários ou retroespalhados. Para identificação da química das inclusões presentes, foi utilizada espectrometria de dispersão de raios-X (EDS) da marca IXRF Systems. Os procedimentos de preparação das superfícies das amostras para MEV foram os mesmos utilizados para MO, assim como a solução de ataque. A respeito das inclusões, além da análise visual, foi feita uma análise quantitativa de imagem no *software Olympus Stream Motion* medindo o percentual de área ocupada pelas mesmas.

2.5 Caracterização Mecânica

Para dureza Vickers foram realizados ensaios utilizando o equipamento emco.TEST modelo M4C 750 G3, com carga de 10Kgf por 15 segundos e 10 indentações feitas em cada amostra (E4 e L4).

Para os ensaios de tração, foram confeccionados seis corpos de prova (três para E4 e três para L4) na direção longitudinal. O ensaio foi realizado a temperatura ambiente em máquina de tração EMIC, modelo DL 30000N, com célula de carga de 98 kN e extensômetro de 25mm e taxa de deformação convencional de $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. A Figura 2 mostra o desenho do corpo de prova de tração. As dimensões foram baseadas na norma DIN EN 10002-1 [5].

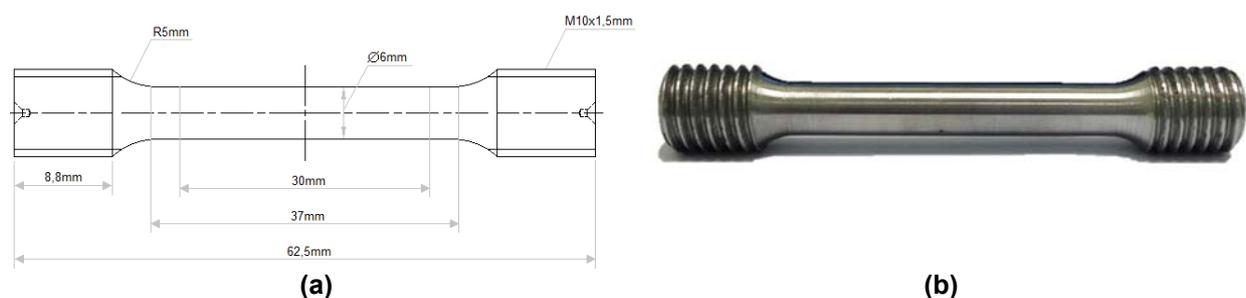


Figura 2. (a) Dimensões do corpo de prova de tração e (b) foto de um dos corpos de prova utilizados no trabalho. Norma DIN EN 10002-1 [5].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição Química

A Tabela 2 mostra as composições químicas obtidas das amostras E4 e L4, e a composição requerida pela norma ASTM A470/A 470M Grau D Classe 8 [4].

Tabela 2. Resultados da Análise Química

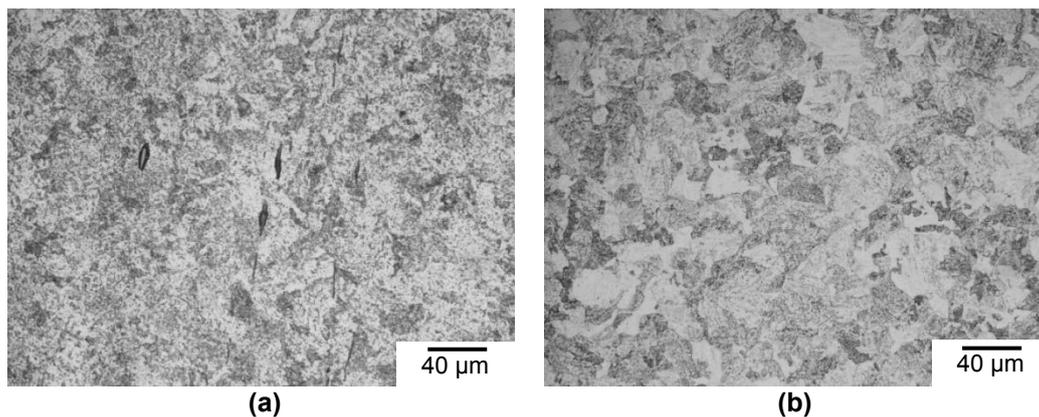
	Norma ASTM A470/A 470M Gr.D Classe 8	E4	L4
C	0,25 - 0,35	0,36	0,25
S	0,015 máx	0,011	0,009
Si	0,10 máx	0,03	0,04
P	0,012 máx	0,026	0,020
Mn	1,00 máx	0,75	0,50
Al	-	<0,01	<0,01
Mo	1,00 - 1,50	1,39	1,3
V	0,20-0,30	0,14	0,15
Ni	0,75 máx	0,08	0,09
Cr	1,05 -1,50	0,88	0,89

Dados em % em peso.

Foi verificado que os teores de cromo e de vanádio ficaram abaixo da especificação requerida pela norma ASTM A470/A 470M Classe 8 [4] nas duas amostras, e que o teor de carbono ficou acima do requerido pela norma apenas na amostra não refundida. Pode-se observar que após a refusão além de uma redução no teor de carbono, também houve redução nos teores de enxofre, fósforo e manganês.

3.2 Caracterização Microestrutural

A Figura 3 apresenta as micrografias obtidas por microscopia ótica, onde é possível identificar a microestrutura bainítica. Na Figura 3(a) podem-se observar inclusões alinhadas no sentido do forjamento. A microestrutura mostra-se heterogênea. Já na Figura 2(b), amostra L4-L, é possível verificar uma microestrutura mais uniforme e homogênea.



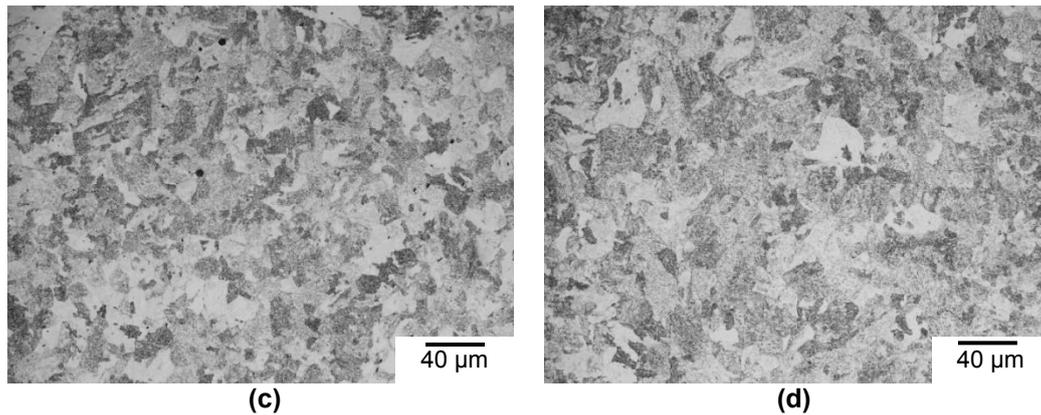


Figura 3. Microscopia óptica feita com aumento de 500x; (a)E4-L (b)L4-L (c)E4-T (d)L4-T

3.2.1 Distribuição das inclusões

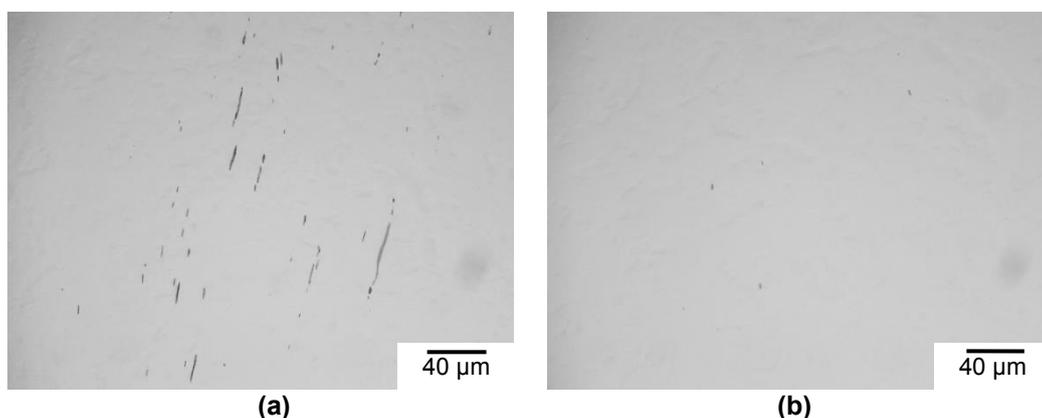
Analisando a distribuição das inclusões das amostras, verifica-se uma grande diferença na quantidade e no tamanho das inclusões entre as amostras E4 e L4. As amostras sem refusão (E4) apresentam inclusões maiores e em maior número quando comparadas as amostras refundidas (L4). É possível verificar também que as inclusões são alongadas e estão alinhadas no sentido longitudinal da barra, paralela à direção de forjamento.

A classificação das inclusões se deu segundo a Norma ASTM E45 [3]. Constatou-se que, devido a refusão, as inclusões passaram de uma classificação Tipo A e Tipo C - Espessura fina - Severidade 2 pelo Método D, para uma classificação Tipo A e Tipo C, - Espessura fina - Severidade ½ pelo Método D. A Figura 4 apresenta a distribuição das inclusões nas amostras. Os valores estão expostos na Tabela 3 e foram obtidos a partir da análise de dez imagens da amostra E4-L e dez imagens da amostra L4-L. Foi calculada então a média e o desvio padrão desses valores.

Tabela 3. Percentual de área ocupada pelas inclusões nas amostras E4-L e L4-L obtidas a partir da análise quantitativa das imagens obtidas com 100x de aumento no microscópio ótico

	Amostra E4-L	Amostra L4-L
Média	0,28%	0,06%
Desvio Padrão	0,08%	0,04%

A partir da análise dos campos, percebe-se marcante redução da área ocupada pelas inclusões. Considerando os valores médios, a amostra E4-L possui 78,57% a mais de área ocupada pelas inclusões que na amostra L4-L.



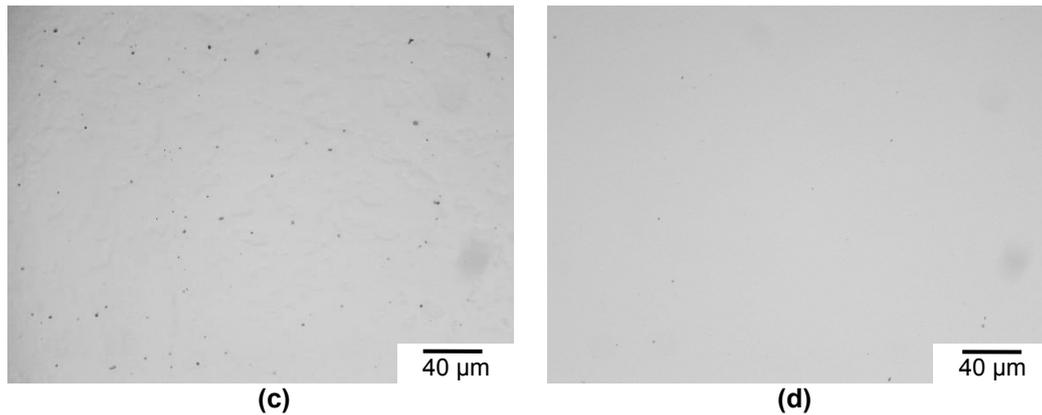


Figura 4. Microscopia óptica feita com aumento de 500x nas amostras sem ataque químico; (a)E4-L (b)L4-L (c)E4-T (d)L4-T

3.2.2 Análise química das inclusões por EDS

A Figura 5 mostra análises feitas por EDS nas inclusões encontradas nas amostras. Pôde-se observar que as inclusões são sulfetos de manganês e silicatos de manganês em sua maioria. Dessa forma, praticamente todas as inclusões estão enquadradas no tipo A (Sulfetos) e tipo C (Silicatos) da Norma ASTM E45 [3]. Foi possível verificar também que essas inclusões podem conter traços de elementos como cromo, vanádio e alumínio. A presença do cromo e do vanádio nessas inclusões demonstra mais um motivo do quão prejudicial elas são para as propriedades do aço, pois há a segregação desses elementos para esses constituintes microestruturais.

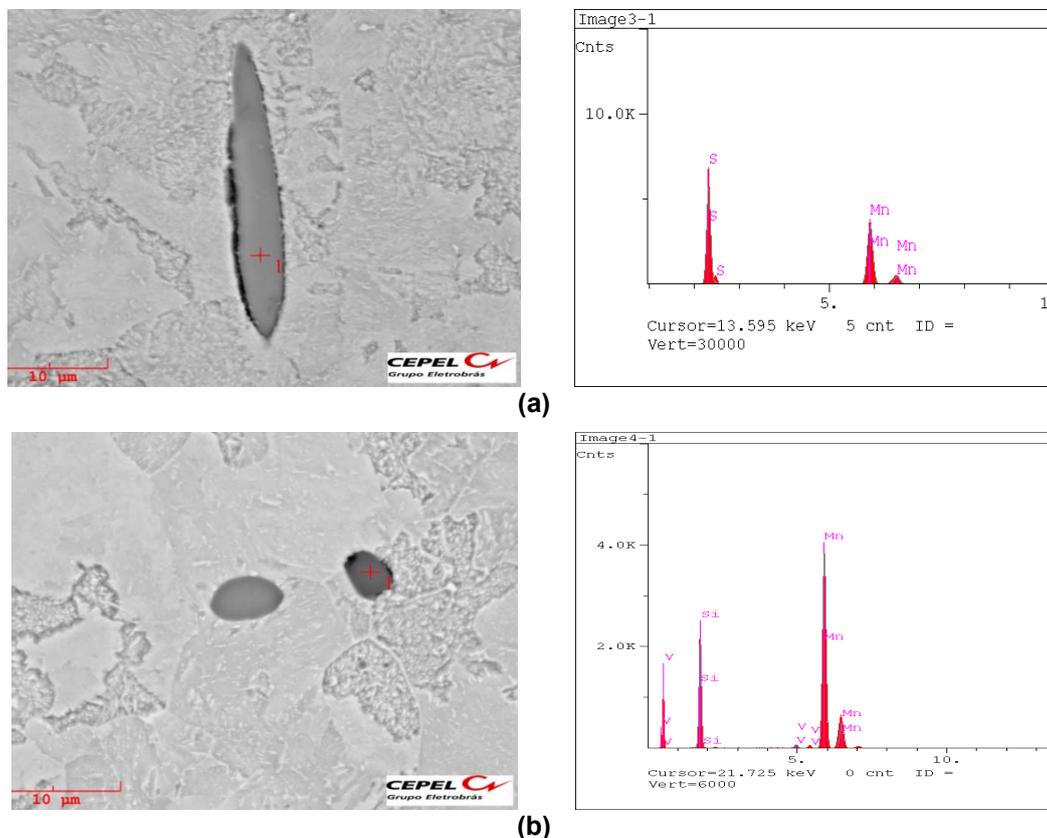


Figura 5. MEV e EDS da amostra **(a)** E4-L com aumento de 6770x mostrando um sulfeto de manganês, e da amostra **(b)** E4-T com aumento de 8000x mostrando um silicato de manganês.

3.3 Caracterização Mecânica

Os resultados obtidos para os ensaios de dureza Vickers são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados de Dureza Vickers

	Dureza [HV]	
	E4	L4
Média	247,5	252,8
Desvio Padrão	3,8	5,2

Na norma ASTM A470 [4] não há padrões de valores de dureza mínima para este aço, pois os valores de dureza estão diretamente ligados às condições de tratamento térmico do material. Quanto maior a temperatura e/ou tempo de revenido menor será a dureza final do material. Sendo assim, é compreensível que as duas amostras tenham apresentado valores parecidos já que tiveram condições semelhantes de forjamento e tratamento térmico [7].

Os dados obtidos pelo ensaio de tração a temperatura ambiente estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5. Dados obtidos através do ensaio de tração

	Norma ASTM A470/A 470M Classe 8	E4	L4
Resistência a Tração - Tensão Máxima [MPa]	725-860	816,69 ± 3,45	815,51 ± 5,76
Limite de Escoamento [MPa]	585	661,28 ± 5,15	667,29 ± 8,14
Alongamento [%]	17	18,44 ± 1,05	17,64 ± 0,66
Redução de Área [%]	43	60,62 ± 0,20	62,81 ± 0,70

Os resultados do ensaio de tração ficaram dentro da especificação requerida pela norma ASTM A470 [4] para as duas amostras. Quando se comparam os valores de resistência obtidos de E4 com L4 não se verifica uma diferença significativa. Assim como no caso do alongamento percentual. Contudo, ao analisar os resultados da redução de área, houve um aumento deste valor na amostra refundida. A maior sensibilidade da redução de área ao efeito das inclusões também foi observada em aço 4140 [6].

4 CONCLUSÃO

Com relação às análises realizadas no material nas duas diferentes condições, pode-se concluir que:

- Foi constatado através da análise química que a refusão se mostrou efetiva na redução de elementos como o enxofre, fósforo e manganês, contribuindo para a redução do tamanho e do número de inclusões do Tipo A e do Tipo C [3] na estrutura do material. Além disso, se apresentaram de forma mais dispersa na microestrutura (passando de um nível de Severidade 2 para ½ no método D de classificação de inclusões da Norma ASTM E45 [3]);

- A microestrutura bainítica se apresentou mais uniforme nas amostras refundidas;
- Como efeito da refusão e redução do tamanho e quantidade de inclusões, houve um aumento na ductilidade do material, evidenciado por um aumento na redução de área. As variações dos valores de resistência (limites de escoamento e resistência) não foram estatisticamente significantes.

REFERÊNCIAS

- 1 Abe, F.; Torsten-Ulf, K.; Viswanathan, R. Creep-resistant Steels, Cambridge: Woodhead Publishing; 2008.
- 2 B. A. Senior. A Critical Review of Precipitation Behaviour in 1Cr-Mo-V Rotor Steels. Material Science and Engineering A. 1988; 103: 263–271.
- 3 ASTM E45. Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels. USA: ASTM; 2007.
- 4 ASTM A470/A470M. Standard Specification for Vacuum-Treated Carbon and Alloy Steel Forgings for Turbine Rotors and Shafts. USA: ASTM; 2006.
- 5 DIN EN 10002-1. Metallic Materials - Tensile Testing, Germany: DIN; 2001.
- 6 Cyril, N., Fatemi, R., Cryderman, B. Effects of Sulfur Level and Anisotropy of Sulfide Inclusions on Tensile, Impact, and Fatigue Properties of SAE 4140 Steel. International Journal of Materials and Manufacturing; 2008.
- 7 Viswanathan, R. Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components. ASM International; 1989.