



Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

COMPORTAMENTO EM FLUÊNCIA DO AÇO 1CrMoV FORJADO PROCESSADO EM FORNO DE REFUSÃO A ARCO

ROBERTA MARTINS DE SANTANA(1); LUIZ HENRIQUE DE ALMEIDA(2); BRUNO REIS CARDOSO(1);
HELOISA CUNHA FURTADO(1); CARLOS FREDERICO TROTTA MATT(1);
CEPEL(1);UFRJ(2);

RESUMO

O aço 1CrMoV possui elevada resistência à fluência e esta característica é favorecida pelo constante aprimoramento da produção de aços com pureza cada vez mais elevadas. Item de norma, a etapa de refusão foi inserida neste processo por promover a redução de elementos deletérios e a homogeneidade química do aço. Os benefícios da refusão em VAR (*vacuum arc remelting*) são a eliminação de gases dissolvidos, a minimização da concentração de elementos deletérios, evitar a macro e a micro segregação. Este trabalho faz um comparativo entre o aço fundido em forno elétrico aberto e o aço refundido em forno VAR.

PALAVRAS-CHAVE

1CrMoV, Refusão, Forno, Fluência, Termelétricas

1.0 - INTRODUÇÃO

A crescente demanda por maior eficiência energética das usinas térmicas movidas a combustíveis fósseis tem provocado avanços nas tecnologias de produção de aços usados em altas temperaturas. A utilização de fornos a vácuo a partir da década de 1960 tornou possível a produção de aços de alta pureza. A implementação da etapa de refusão como item de norma deu garantia de melhor qualidade a estes aços com homogeneidade e uniformidade na composição química dos mesmos.

Há mais de sessenta anos que o aço 1CrMoV é largamente utilizado na fabricação de rotores de turbinas para geração de energia, devido às suas excelentes propriedades mecânicas, com destaque para a característica de elevada resistência à fluência. As condições favoráveis à utilização deste aço em rotores de turbinas estão também diretamente ligadas ao desenvolvimento tecnológico da etapa de fundição. A etapa da refusão foi inserida no processo de fabricação do aço 1CrMoV, buscando melhorias nas propriedades de fluência.

A fluência é um mecanismo progressivo de difícil detecção e controle que pode causar acidentes catastróficos e grandes perdas financeiras. Uma microestrutura inadequada pode levar a falhas prematuras de componentes que operam sob este regime, como é o caso do rotor.

Os principais benefícios do processo de refusão a arco sob vácuo são: a eliminação de gases dissolvidos, tais como: o hidrogênio e o nitrogênio; a minimização da concentração de elementos deletérios com elevada pressão de vapor; a eliminação de óxidos e a obtenção de uma solidificação direcional do lingote de baixo para cima, de maneira a evitar a macro segregação e minimizar a micro segregação(1,2).

Este trabalho tem por objetivo fazer uma análise comparativa entre o aço que passou pela etapa de refusão em VAR (*vacuum arc remelting*) e o aço não refundido, de modo a detectar particularidades que justifiquem a etapa de

refusão e o melhor desempenho sob o regime de fluência do aço 1CrMoV que passou pela etapa de refusão em VAR. Para isso, uma cuidadosa caracterização deste aço foi realizada nas condições fundido em forno elétrico aberto e refundido em VAR, incluindo análise química, ensaios de tração a temperatura ambiente e a quente, ensaios de fluência, ensaio de microdureza Vickers e microscopia de luz visível.

2.0 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Material

O material utilizado para realização deste trabalho consiste em um aço 1Cr-1Mo-0,25V (1CrMoV) 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(3).

2.2 - Fabricação e Refusão dos Eletrodos

O aço 1CrMoV, utilizado neste estudo, foi fabricado na forma de oito eletrodos com 60 mm de diâmetro e 910 mm de comprimento. As barras obtidas pelo processo de fusão em forno elétrico aberto por indução eletromagnética foram previamente preparadas para servirem como eletrodos no 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 sob vácuo, modelo L200 da empresa *ALD Vacuum Technologies*. A refusão no VAR-COPPE, permitiu uma fusão com menores pressões na câmara do forno, quando comparado aos modelos VAR industriais mais utilizados, permitindo assim melhor controle de impurezas.

Na refusão apenas $\frac{3}{4}$ de cada eletrodo foi refundido, sendo assim, ficaram disponíveis oito eletrodos (fundidos) e oito lingotes correspondentes (refundidos), dos quais apenas uma barra de cada condição foi amostrada. As barras foram assim identificadas: E4 (antes da refusão) e L4 (após a refusão). Dessa forma foi possível observar a importância desta etapa no processo de obtenção do aço, avaliando o material antes e após a refusão.

As barras amostradas, E4 (antes da refusão) e L4 (após a refusão), assim como todas as outras, mesmo as que não passaram pela etapa de refusão, foram forjados a quente em barras de perfil quadrado com aproximadamente 35 mm de lado. Após o forjamento, as barras passaram por tratamento térmico duplo de normalização e por revenimento, como indicado na norma ASTM A470/A470M(3).

O processo de têmpera que faz parte do método de fabricação de rotores forjados não foi necessário neste trabalho, pois a espessura das barras forjadas permitiu taxas de resfriamento aceleradas mesmo com resfriamento ao ar. No caso da fabricação de grandes peças forjadas, como é o caso de um rotor, a taxa de resfriamento no centro da peça é lenta, sendo a têmpera essencial para que se alcance a microestrutura bainítica no centro da mesma. As condições dos tratamentos térmicos estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Condições dos Tratamentos Térmicos Realizados Nas Barras E4 e L4.

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

Nota (1): A partir deste momento, toda vez que o texto fizer referência às siglas E4 e L4 fica subentendido que se tratam das barras E4 (antes da refusão) e L4 (após a refusão).

2.3 - Análise Química

Foram analisadas amostras retiradas do meio e de uma das extremidades das barras, E4 e L4, de modo que fosse possível avaliar os efeitos dos processos de refusão, solidificação e conformação a quente, além de verificar se o aço atende aos requisitos especificados pela Norma ASTM A470/A470M(3) para composição química. Foram utilizadas as técnicas de combustão e emissão ótica na quantificação dos elementos.

2.4 - Caracterização Microestrutural

Para metalografia, foram cortadas amostras da seção longitudinal das barras E4 e L4. As amostras foram embutidas a quente no equipamento BUEHLER modelo SimpliMet® 3000 *Automatic Mounting Press*. Após o embutimento as amostras foram lixadas e polidas automaticamente em politriz Buehler Automet 3000. Após o preparo das superfícies, as amostras foram atacadas utilizando o reagente Nital 2% para revelar a microestrutura bainítica. As amostras foram observadas e fotografadas no microscópio Olympus GX 71, a fim de analisar e comparar a microestrutura bainítica e a distribuição das inclusões nas amostras E4 e L4. Após obter as imagens necessárias, as amostras foram novamente preparadas e atacadas com reagente para revelar tamanho de grão de

austenita prévia, que tem a seguinte composição: 6g de ácido pícrico, 2mL de ácido clorídrico, 100mL de água destilada e 20mL de detergente neutro.

2.5 - Caracterização Mecânica

Foram realizados ensaios de tração a temperatura ambiente e a temperatura de 550°C. Para isso, foram confeccionados doze corpos de prova, dos quais seis foram retirados da barra E4 e os outros seis foram retirados da barra L4, todos tomados na direção longitudinal. Tanto na temperatura ambiente, quanto na temperatura de 550°C foram ensaiados três corpos de cada condição (E4 e L4). Os modelos de corpos de prova seguiram as dimensões da Norma DIN EN 10002-1(4), para a tração a temperatura ambiente e Norma ISO 6892-2(5), para a tração a 550°C. Os ensaios realizados a temperatura ambiente tiveram como objetivo obter dados de possíveis diferenças nas resistências mecânicas entre as amostras E4 e L4 e compará-las aos dados referenciados na Norma ASTM A470/A470M(3) e à planilha de dados do *National Institute for Materials Science* (NIMS)(6) para este material. Os ensaios a temperatura ambiente foram realizados em máquina de tração EMIC, modelo DL 30000, com célula de carga de 10.000kgf e extensômetro de 25 mm e, com taxa de deformação convencional de $5,55 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ (velocidade do ensaio de 1mm/min). Os ensaios realizados a temperatura de 550°C tiveram como objetivo obter dados de possíveis diferenças nas resistências mecânicas entre as amostras E4 e L4 e compará-las à planilha de dados NIMS para este material. O ensaio de tração a quente foi realizado na máquina EMIC, modelo DL 30000, com célula de carga de 10.000 kgf, sem extensômetro e a velocidade da ponte de 1,5mm/min. As normas de ensaio seguidas foram as ASTM E8/E8M(7) e ASTM E21(8).

Os ensaios de fluência foram conduzidos do seguinte modo: oito corpos de prova convencionais de fluência para cada barra, E4 e L4, com as mesmas dimensões e geometria do ensaio de tração a quente. Os corpos de prova foram ensaiados de acordo com a norma ASTM E139(9) em condições diferentes de carregamento constante e na temperatura de 550°C. Foram utilizadas máquinas de fluência de fabricação ZWICK//ROELL modelo KAPPA 50 LA, de carga constante e com três termopares para medir a temperatura de cada forno. Os corpos de prova tiveram seus alongamentos medidos por extensômetro, com abertura inicial de 30 mm, preso diretamente ao corpo de prova e deslocamento lido por dois LVDTs. A temperatura dos corpos de prova foi medida por três termopares distribuídos ao longo de sua extensão. Os ensaios de fluência se deram até a ruptura dos corpos de prova. As tensões de ensaio utilizadas foram: 350MPa, 280MPa, 265MPa e 240MPa.

O ensaio de microdureza das amostras foi realizado na escala Vickers. O equipamento utilizado foi o microdurômetro BHUELER modelo Micromet 5103 e o ensaio foi realizado segundo a norma ASTM E 384-17(10), carga de 300 gf e um tempo de indentação de 30 segundos na região deformada plasticamente pela fratura.

3.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Composição Química

As Tabelas 2 e 3 mostram as composições químicas obtidas das amostras E4 e L4, e a composição requerida pela norma ASTM A470/A 470M Grau D Classe 8(3).

Tabela 2 – Resultados da Análise Química para Elementos Especificados em Norma. (Dados em % em massa)

	Norma ASTM A470/A 470M Grau D Classe 8	Antes da refusão (E4) - Meio	Antes da refusão (E4) - Extremidade	Após a refusão (L4) - Meio	Após a refusão (L4) - Extremidade	Incerteza
C	0,25-0,35	0,36	0,36	0,31	0,37	0,01
Si	0,10 máx	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Mn	1,00 máx	0,79	0,78	0,70	0,68	0,01
P	0,012 máx	0,02	0,02	0,02	0,02	0,002
S	0,015 máx	0,01	0,01	0,01	0,01	0,001
Cr	1,05-1,50	1,17	1,15	1,17	1,17	0,03
Mo	1,00 -1,50	1,40	1,39	1,45	1,43	0,02
Ni	0,75 máx	0,08	0,07	0,06	0,06	0,01
V	0,20-0,30	0,17	0,16	0,17	0,17	0,01
Al	0,015 máx	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,004

Tabela 3 – Resultados da Análise Química para Impurezas com Teores Não Especificados na Norma. (Dados em % em massa)

	Antes da refusão (E4) - Meio	Antes da refusão (E4) - Extremidade	Após a refusão (L4) - Meio	Após a refusão (L4) - Extremidade	Incerteza
As	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001
Sb	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,001
Sn	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,001
N	0,007	0,005	0,006	0,005	0,002

A análise química dos aços E4 e L4 mostrou que estes atendem as especificações da Norma ASTM A470-470M (3), levando em consideração os desvios-padrões calculados. Ao mesmo tempo, é possível notar que o aço após a etapa de refusão apresentou pouca ou nenhuma redução nos teores dos elementos químicos se comparado ao aço de antes refusão.

Mesmo com a pouca diferença entre os aços é necessário ressaltar que ambos apresentaram teores de Mn abaixo do limite máximo especificado pela norma. Ligas com apreciáveis concentrações de Mn são mais susceptíveis ao fenômeno de fragilização ao revenido, uma vez que este elemento agrava o efeito das impurezas, portanto, teores de Mn mais baixos são interessantes quando se trata de uma liga com baixos teores de impurezas, principalmente enxofre(11,12).

3.2 - Caracterização Microestrutural

A Figura 1 apresenta as imagens obtidas por microscopia de luz visível que mostram uma microestrutura bainítica. Na Figura 1(a), amostra E4, pode-se observar inclusões alinhadas no sentido da forja. A microestrutura mostra-se heterogênea. Já na Figura 1(b), amostra L4, é possível verificar uma microestrutura mais uniforme.

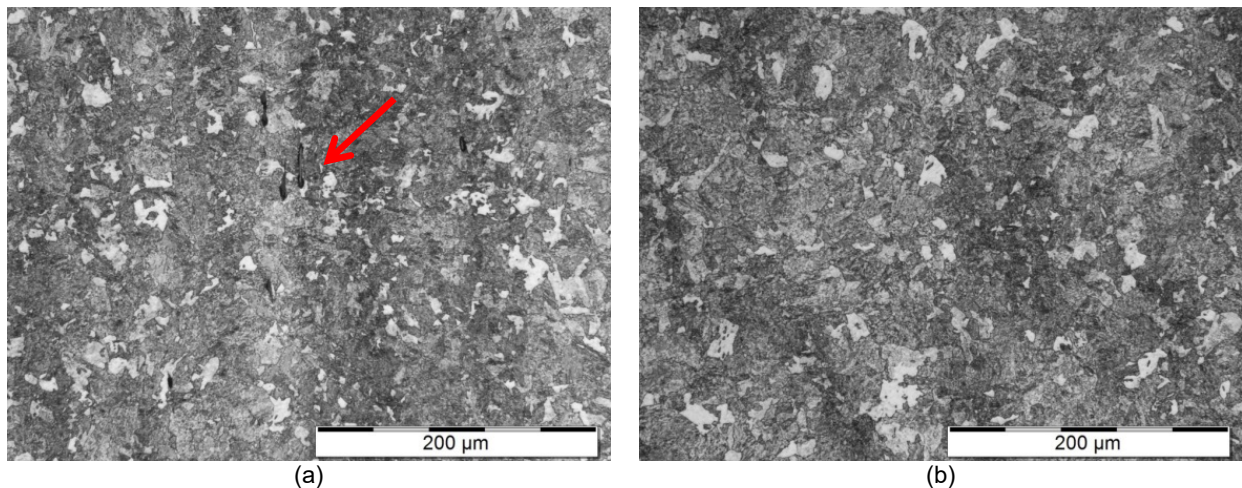


Figura 1 – Microscopia de luz visível das amostras E4(a) e L4(b). A seta aponta para as inclusões. Direção longitudinal.

3.3 - Tamanho de Grão

A média do tamanho de grão médio (TG) da austenita prévia no aço após a refusão apresentou-se maior em relação ao aço antes da refusão. A Figura 2 apresenta o resultado desta análise com o tamanho de grão médio para cada caso, baseado em 10 leituras.

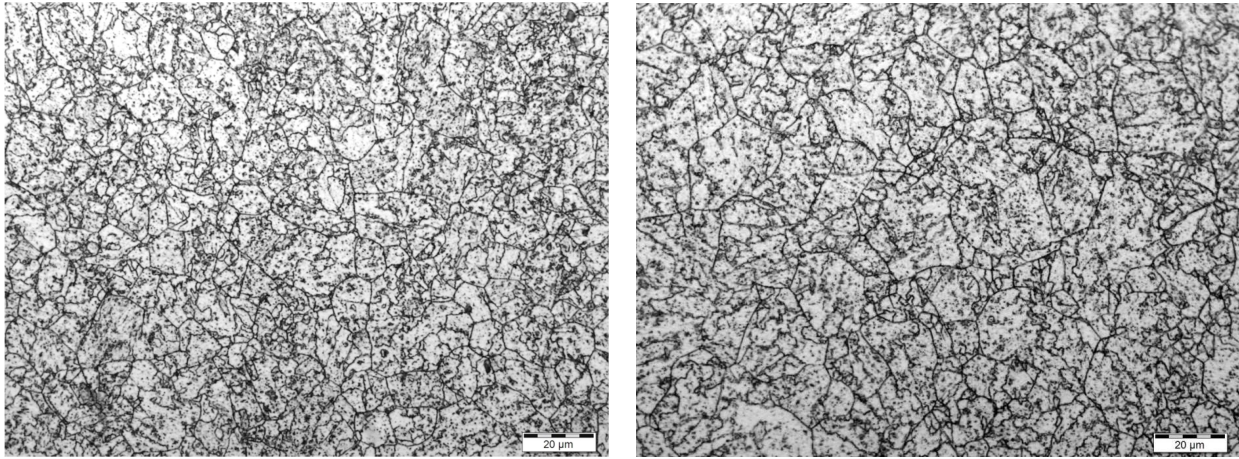


Figura 2 – Microscopia de luz visível. (a) E4 – TG = $9,8 \pm 2\mu\text{m}$, (b) L4– TG = $13,3 \pm 2,9 \mu\text{m}$.

Quando as impurezas presentes no aço estão na forma de inclusões, ou de partículas de segunda fase, estas se tornam barreiras à movimentação dos contornos, devendo estes atravessarem as partículas para continuar a sua migração(13). Quanto mais partículas, mais efetiva será a inibição à movimentação destes contornos afetando o crescimento do grão.

A etapa de refusão do aço tem como alguns dos objetivos homogeneizar a composição química e uniformizar a microestrutura. Estes efeitos contribuíram para eliminar, consideravelmente, boa parte das inclusões presentes no aço, como pôde ser observado anteriormente, bem como podem ter contribuído para diminuir a segregação de átomos de soluto nos contornos de grão. Um tamanho de grão maior, observado no aço que passou pela etapa de refusão, é um dos resultados positivos da etapa de refusão em VAR.

3.4 - Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente

Os resultados do ensaio de tração a temperatura ambiente ficaram dentro do especificado pela Norma ASTM A 470/470M(3) para as duas amostras ensaiadas, E4 e L4. Os resultados médios da planilha de dados do (MINS)(6) corroboram os resultados deste ensaio. A Tabela 2 apresenta o resultado deste ensaio.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de tração a temperatura ambiente – E4 e L4. Adaptado de(14).

	Norma ASTM A470/A 470M Classe 8	E4	L4	NIMS
Resistência à Tração –				
Tensão Máxima (MPa)	725-860	817 ± 3	816 ± 6	812 ± 13
Limite de Escoamento (MPa)	585	661 ± 5	667 ± 8	657 ± 22
Alongamento (%)	17	18 ± 1	$17,6 \pm 0,7$	18 ± 1
Redução de Área (%)	43	$60,6 \pm 0,2$	$62,8 \pm 0,7$	61 ± 2

Como pôde ser observado não houve variações significativas nos resultados dos ensaios de tração realizados a temperatura ambiente em função da refusão no VAR.

3.5 - Ensaio de Tração a Quente

A Norma ASTM A470/470M(3) não prevê valores de referência para as propriedades de tração quando o aço é ensaiado em temperaturas acima da ambiente. Neste caso, as propriedades de tração extraídas à temperatura de 550°C tiveram por objetivo comparar as amostras E4 e L4 e verificar se a etapa de refusão tem influência nos resultados de tração nesta temperatura, conforme tabela 3. A temperatura do ensaio escolhida é a mesma na qual os corpos de prova de fluência foram ensaiados.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de tração a temperatura de 550°C para as amostras E4 e L4.

	E4	L4	NIMS
Resistência à Tração –			
Tensão Máxima (MPa)	510 ± 7	525 ± 5	517 ± 12
Limite de Escoamento (MPa)	480,6 ± 0,6	496 ± 9	443 ± 15
Alongamento (%)	18,1 ± 0,2	17,5 ± 0,6	19 ± 1
Redução de Área (%)	81 ± 2	82 ± 1	80 ± 3

Os resultados da Tabela 3 mostram que não há diferenças significativas entre as propriedades de tração das amostras E4 e L4, na temperatura de 550°C, que possam ser atribuídas à etapa de refusão.

Os resultados deste ensaio foram comparados à média dos valores obtidos na planilha de dados do NIMS(6), para os corpos de prova ensaiados na mesma temperatura, e os mesmos mostraram-se muito semelhantes.

3.6 - Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado nas amostras nas condições antes e após o ensaio de fluência, conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de microdureza na escala Vickers - E4 e L4.

Amostra	Antes do ensaio de fluência	Fluência a 550°C			
		350 MPa	280 MPa	265 MPa	240 MPa
E4	276 ± 5	264 ± 3	251 ± 5	243 ± 3	236 ± 2
L4	274 ± 4	264 ± 5	251 ± 4	247 ± 3	234 ± 3

Não foram constatadas diferenças expressivas nos resultados de microdureza entre as amostras E4 e L4, na condição antes do ensaio de fluência. A norma ASTM A470/470M(3) não indica valores mínimos de microdureza para este aço, pois estes valores estão também ligados às condições de tratamento térmico do material. Quanto maior a temperatura e/ou tempo de revenimento menor será a dureza final do material. Sendo assim, é compreensível que as duas amostras tenham apresentado valores parecidos já que, apesar de uma ter passado pela etapa de refusão e a outra não, elas sofreram forjamento e tratamento térmico nas mesmas condições.

A Figura 3 apresenta as medidas de dureza em função da diminuição da tensão inicial dos ensaios de fluência. Esses resultados mostram uma queda contínua da dureza com o decréscimo da tensão inicial, ou seja, com o aumento do tempo de ensaio e diminuição da taxa de fluência $\frac{d\varepsilon}{dt}$.

Para as amostras ensaiadas por fluência também não foi possível observar diferenças significativas nos valores de microdureza, quando comparamos as condições antes e após a refusão, conforme Figura 3.

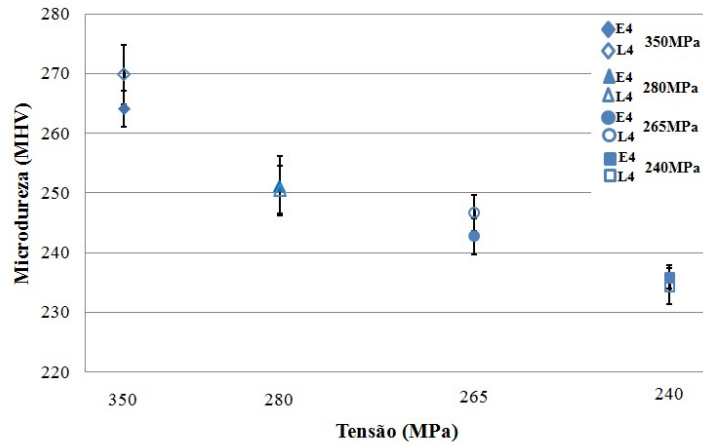


Figura 3 – Valores de microdureza Vickers, após ensaio de fluência, em função da tensão inicial de ensaio - E4 e L4. Microdureza Vickers, 300gf, 30s.

3.7 - Ensaio de Fluência

O aço que passou pela etapa de refusão a vácuo em forno a arco apresentou valores superiores para os tempos de ruptura em relação ao aço que não passou por essa etapa. O ganho de resistência pode ser observado também pela diminuição da taxa mínima de fluência.

As Figuras 4 (a), (b) e (c) apresentam a dependência do tempo de ruptura (t_R), taxa mínima ($\dot{\epsilon}_{\min}$) e deformação ($\epsilon\%$) em função do carregamento. O tempo de ruptura e a taxa mínima evidenciam o comportamento superior da liga que passou pela etapa de refusão.

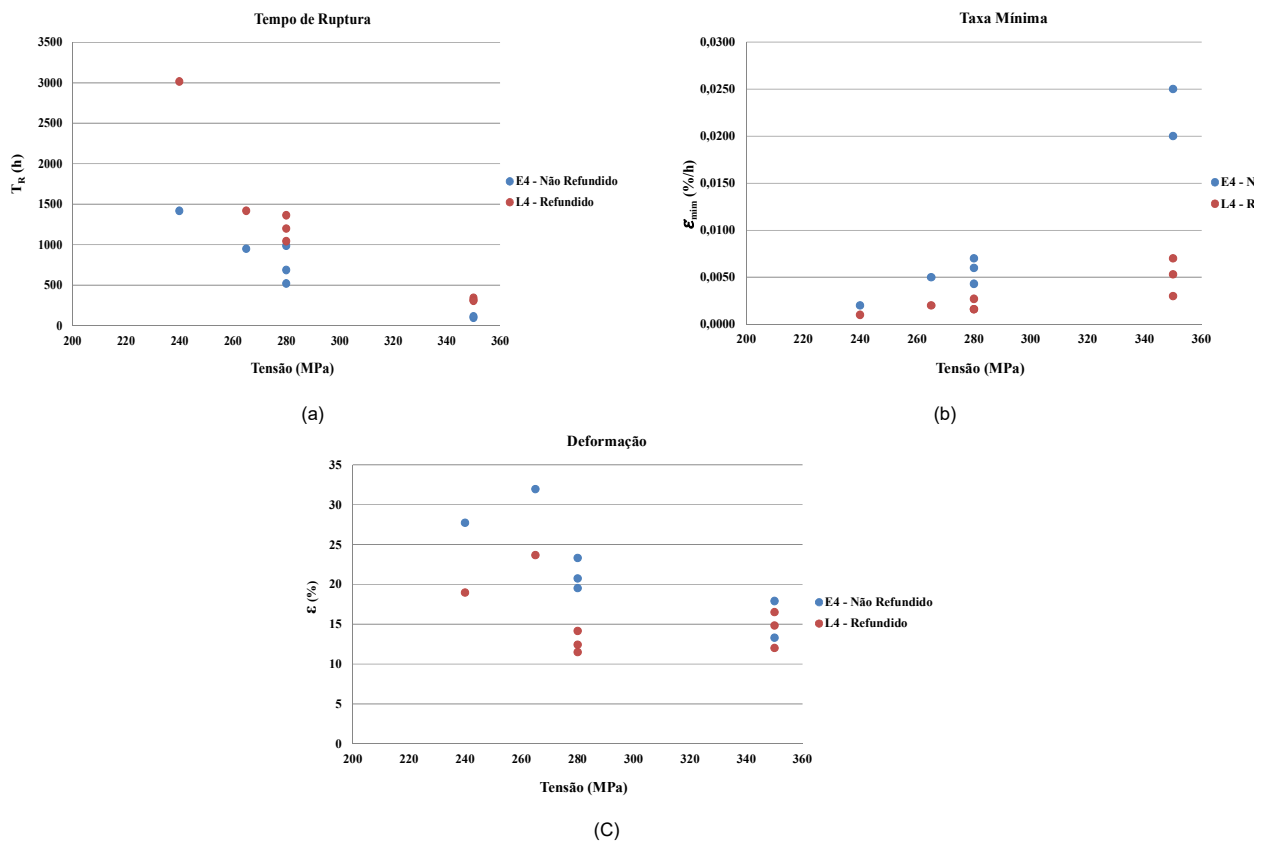


Figura 4 - Curvas com os resultados do ensaio de fluência. (a) t_R em função do carregamento, (b) $\dot{\epsilon}_{\min}$ em função do carregamento e (c) ϵ (%) em função do carregamento.

A variação de ductilidade mostrou uma dispersão, embora similar para os dois casos, não convencional para o comportamento em fluência. Isso se deve ao tempo relativamente curto utilizado nesta análise e a dispersão natural dessa propriedade. Cabe ressaltar que, mesmo não convencional, a variação na ductilidade apresentada neste estudo se assemelha aos resultados apresentados na planilha de dados do NIMS para o aço 1CrMoV em condições similares(6).

4.0 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que houve um significativo aumento da vida em fluência para o aço refundido em VAR, com taxas mínimas de fluência menores quando comparadas as do aço não refundido. O melhor desempenho da vida em fluência está associado a uma microestrutura mais uniforme, homogeneidade química e redução e refino de sulfetos.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) AMERICAN SOCIETY FOR METALS, ASM, *Heat Treating*, ASM Handbook, volume 4, Ohio, ASM International, 1997.
- (2) CHAUDHURI, S., GHOSH, R.N., “*Creep behavior of 2.25Cr1Mo steel—Effects of thermal ageing and pre-strain*”, *Materials Science and Engineering A* 510–511, 136–141, 2009.
- (3) ASTM A470/A470M – “*Standard Specification for Vacuum-Treated Carbon and Alloy Steel Forgings for Turbine Rotors and Shafts*”, ASTM, USA, 2006.
- (4) DIN EN 10002-1 – “*Metallic Materials - Tensile Testing*”, DIN, Germany, 2001.
- (5) ISO 6892-2 – “*Metallic Materials - Tensile Testing*”, ISO, 2011.
- (6) NATIONAL INSTITUTE FOR MATERIALS SCIENCE, NIMS, *Creep Datasheets*, disponível em: http://smds.nims.go.jp/creep/index_en.html. Acesso em: 10/08/17.
- (7) ASTM E8/E8M – “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”, ASTM, USA, 2011.
- (8) ASTM E21 – “*Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*”, ASTM, USA, 2009.
- (9) ASTM E139 – “*Standard test methods for conducting creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials*”, ASTM, USA, 2011.
- (10) ASTM E384 – “*Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*”, ASTM, USA, 2017.
- (11) CALLISTER, W.D., “*Fundamentals of Materials Science and Engineering*”, 5th edition, USA, John Willey and Sons, Inc., 1991.
- (12) WILLIAMSON, R.L., SCHILEINGER, M.E., HYSINGER, C.L., BEAMAM, J.J., “*Modern Control Strategies for Vacuum Arc Remelting of Segregation Sensitive Alloys, Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivates*”, The Mineral, Metals & Materials Society, Editado por E.A. Loria, 1997.
- (13) REED-HILL, R. E. *Princípios de Metalurgia Física*. 2^a. Ed., Guanabara - Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- (14) ROZA, G.C.S.; DE ALMEIDA, L.H.; CARDOSO, B.R.; ARAUJO, L.S.; “*Avaliação da Refusão de Aços 1Cr-Mo-V Forjados Para Rotores de Turbinas a Vapor*”, 70^o Congresso Anual da ABM, vol. 70, num. 70, Rio de Janeiro, 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS



Roberta Martins de Santana

Licenciatura em Matemática pela UNIGRANRIO – Rio de Janeiro, 2003.

Mestrado em Ciências Metalúrgicas e de Materiais pela UFRJ – Rio de Janeiro, 2018.

Atua como Profissional de Nível Médio Operacional no CEPEL/Eletronbras.