

ANÁLISE DOS PROCESSOS DE REFUSÃO E DUPLA REFUSÃO DE LINGOTE DE LIGA DE ZIRCÔNIO*

Leonardo Sales Araujo¹
Luiz Henrique de Almeida¹

Resumo

Ligas de zircônio encontram grande aplicação em componentes estruturais do núcleo de reatores nucleares, dadas suas vantagens como resistência mecânica e a corrosão e baixa seção de choque de nêutrons térmicos. Contudo, por se tratar de uma liga reativa e necessitar de homogeneidade química e microestrutural, requer processos de fusão especiais como refusão a arco em vácuo. No presente trabalho, foi produzido um lingote de liga de zircônio a partir de briquetes de zircônio esponja compactados e unidos por soldagem para a composição do eletrodo. Foram realizadas duas refusões para aumento do tamanho do lingote e aumento da sua limpeza. As duas fusões foram analisadas por meio de observação das variáveis de processo. Foi possível corroborar a viabilidade do processo de fabricação do lingote de zircônio em duas etapas de refusão. A análise das variáveis de processo mostrou que a primeira etapa de refusão apresentou maior instabilidade durante a fusão, o que poderia afetar a estrutura de solidificação. Com isso, uma etapa de refusão foi realizada, com maior estabilidade, além de potencialmente propiciar maior grau de limpeza e homogeneidade da liga.

Palavras-chave: Liga de zircônio; Refusão a arco em vácuo.

ANALYSIS OF THE REMELTING AND DOUBLE REMELTING PROCESSES OF A ZIRCONIUM ALLOY INGOT

Abstract

Zirconium alloys find applications as structural components for the core of nuclear reactors, due to its high strength, corrosion resistance and low thermal neutron capture cross section. However, due to reactivity of the alloy and requirements of chemical and microstructural homogeneity, special melting processes are necessary, like the vacuum arc remelting. In the present work, a zirconium alloy ingot was produced from zirconium sponge briquets, welded to compose an electrode. Two remeltings were made in order to provide a bigger ingot and improve its cleanliness. Both remeltings were analyzed from its process variables. It was possible to corroborate the viability of the process through two remelting steps. The analysis of variables has shown that the first remelting step was more unstable than the second one with a potential influence on solidification structure. The second remelting was significantly more stable, potentially promoting higher cleanliness and alloy homogenization of the ingot.

Keywords: Zirconium alloy; Vacuum arc remelting.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Professor do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Zircônio e suas ligas tem ampla utilização em componentes do núcleo de reatores nucleares de água pressurizada como, por exemplo, grades espaçadoras ou tubos com as pastilhas de combustível nuclear, UO_2 . As ligas de zircônio são amplamente usadas nos ambientes de núcleos de reatores nucleares devido a sua excelente combinação de resistência mecânica, a fluência e a corrosão, assim como baixa seção de choque, com baixa absorção de nêutrons térmicos [1].

Dados os requisitos das ligas para utilização em ambiente nuclear, o processo de refusão das mesmas deve garantir baixos teores de impurezas e uma estrutura de solidificação adequada ao posterior processamento termomecânico. Adicionalmente, por se tratar de um metal reativo, sua refusão deve ocorrer em atmosfera inerte ou sob vácuo [2-4]. Em função desses requisitos, o processo de refusão a arco em vácuo (VAR) é amplamente utilizado para a produção de ligas de metais reativos e/ou sensíveis a segregação para aplicações críticas, como zircônio, titânio ou superligas. O processo alia uma atmosfera protetora com controle de processo, resultando em um lingote com baixo teor de impurezas e uma estrutura de solidificação otimizada [2,3,5-7]. As ligas de zircônio são produzidas a partir de partículas de zircônio esponja e adições de ligas, compactados em briquetes e soldados em um eletrodo para refusão [6]. Normalmente uma segunda refusão da liga é realizada para homogeneização e controle da estrutura.

No processo VAR, um arco de corrente contínua é criado entre um eletrodo e algum material de partida, como limalhas na base de um cadinho de cobre resfriado a água. Com a fusão da ponta do eletrodo, um lingote se forma gradativamente a partir da base do cadinho [8].

No presente trabalho foi realizada a refusão (identificada como **RF1**) e dupla refusão (identificada como **RF2**) de uma liga de zircônio a partir de briquetes de zircônio esponja com elementos de liga. Tanto o processo de obtenção do eletrodo a partir de briquetes, como os processos RF1 e RF2 foram analisados.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Particulado de zircônio esponja e adições de ligas foram compactadas em uma prensa em briquetes com diâmetro de 60 mm e comprimento de 60 mm. A densidade média dos briquetes foi de $5,4 \text{ g/cm}^3$. Sequencialmente, os mesmos foram soldados para a composição de eletrodos para a refusão. A soldagem dos briquetes foi realizada de forma autógena por TIG e feixe de elétrons. A Figura 1 mostra um briquete fabricado e detalhe da união entre os briquetes.

Na primeira etapa do processo (RF1), os eletrodos fabricados foram refundidos em forno VAR ALD L200ZrTi, utilizando um cadinho de 120 mm de diâmetro. Os lingotes gerados tiveram diâmetro com cerca de 119 mm de diâmetro e de 80-130 mm de comprimento. Após RF1, os lingotes foram usinados e unidos por TIG para compor um novo eletrodo. A Figura 2 mostra um lingote produzido a partir dos briquetes e novo eletrodo composto de 5 lingotes usinados e soldados. A subsequente refusão (RF2) resultou em um lingote com 148 mm de diâmetro e cerca de 290 mm de comprimento, com um peso total de cerca de 30 kg, apresentado na Figura 3. Nas duas etapas de refusão o processo foi controlado, primordialmente, em função das variáveis de controle como corrente aplicada ao eletrodo, voltagem e pressão de vácuo. Na análise posterior do processo, além das supracitadas outras variáveis foram analisadas, como taxa de fusão e curtos por gotejamento.

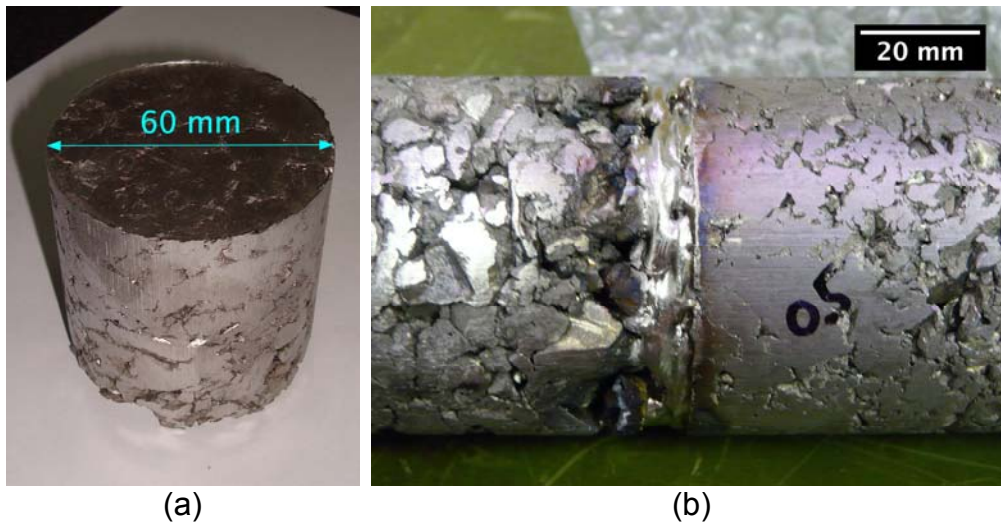


Figura 1. (a) Briquete fabricado a partir do zircônio esponja e; (b) detalhe da união dos briquetes.

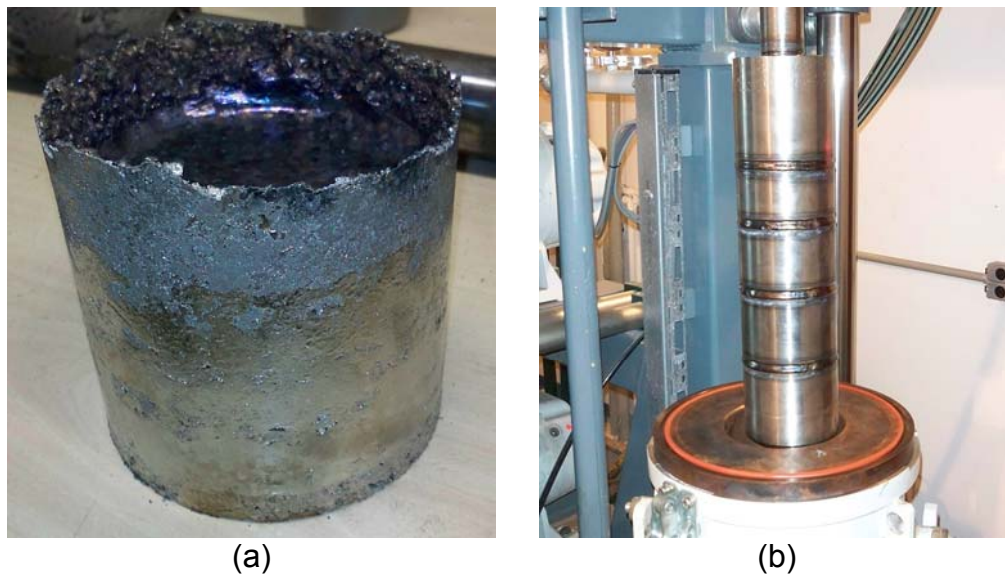


Figura 2. (a) Lingote produzido após RF1 e; (b) eletrodo composto dos lingotes produzidos em RF1 (após usinagem e soldagem para compor o eletrodo).



Figura 3. Lingote refundido após RF2 .

Para o processo de refusão, inicialmente se determina um menor valor de corrente, de forma a prover o aquecimento do eletrodo e iniciar o processo de fusão. Esse etapa dura um tempo definido e é conhecido como etapa de iniciação (*start phase*). Em seguida, há o aumento linear da corrente para um valor de patamar, onde a maior parte do processo de refusão deve ocorrer, conhecido como etapa de fusão (*melt phase*). Esse aumento de corrente resulta em uma maior taxa de fusão do eletrodo. Por fim, em alguns casos, pode-se realizar uma etapa de finalização (*hot topping*), onde a corrente é reduzida para um menor patamar, reduzindo a taxa de fusão e a voltagem é aumentada, aumentando o espaçamento do arco. Tal etapa tem por objetivo a redução de defeitos por contração (rechupes).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta uma compilação dos gráficos de controle do processo de refusão (RF1) de um dos eletrodos constituído de briquetes de zircônio esponja. Para a corrente de fusão, observam-se as etapas de iniciação e de fusão, em modo estável. O gráfico da voltagem do arco revela que, com cerca de 69 segundos de processo, houve uma ocorrência significativa de curto circuito (*dead short*). Tal fenômeno é associado a uma queda da voltagem e extinção momentânea do arco elétrico por efeito do contato do eletrodo com a poça de fusão. O fenômeno pode ser corroborado ao se observar a variação na posição do eletrodo, induzida pelo recuo do braço de movimentação do eletrodo, de forma a prover a distância correta para a manutenção do arco elétrico. As análises dos gráficos da taxa de fusão e da taxa de gotejamento indicam que, apesar do primeiro gráfico indicar o início da fusão de material após 59 segundos, a taxa de gotejamento indica o início da fusão após 11 segundos de processo. Isto decorre da forma de determinação da taxa de fusão, a qual é estimada e utiliza métodos de atenuação de ruídos, como por exemplo, médias móveis ou regressões, as quais induzem um atraso na representação gráfica [9,10]. Cabe também relatar que não houve tempo hábil para se atingir um estado estacionário na taxa de fusão, terminando o processo ainda em um estado crescente. Os fatores que contribuíram para tal fato foram a maior corrente de fusão utilizada e a relação entre o diâmetro do cadinho e o do eletrodo. Também pode-se observar que a variação na taxa de gotejamento (com conseqüente aumento na transferência de massa) resultou em uma simultânea variação na pressão da câmara. Uma maior pressão é resultante de maior liberação de gases e elementos voláteis durante o processo de fusão. As variações no processo na primeira fusão podem levar a variações na estrutura de solidificação e formação de defeitos. Isso cria a necessidade de uma refusão do material, para controle da estrutura de solidificação, homogeneização da liga e aumento da pureza da mesma.

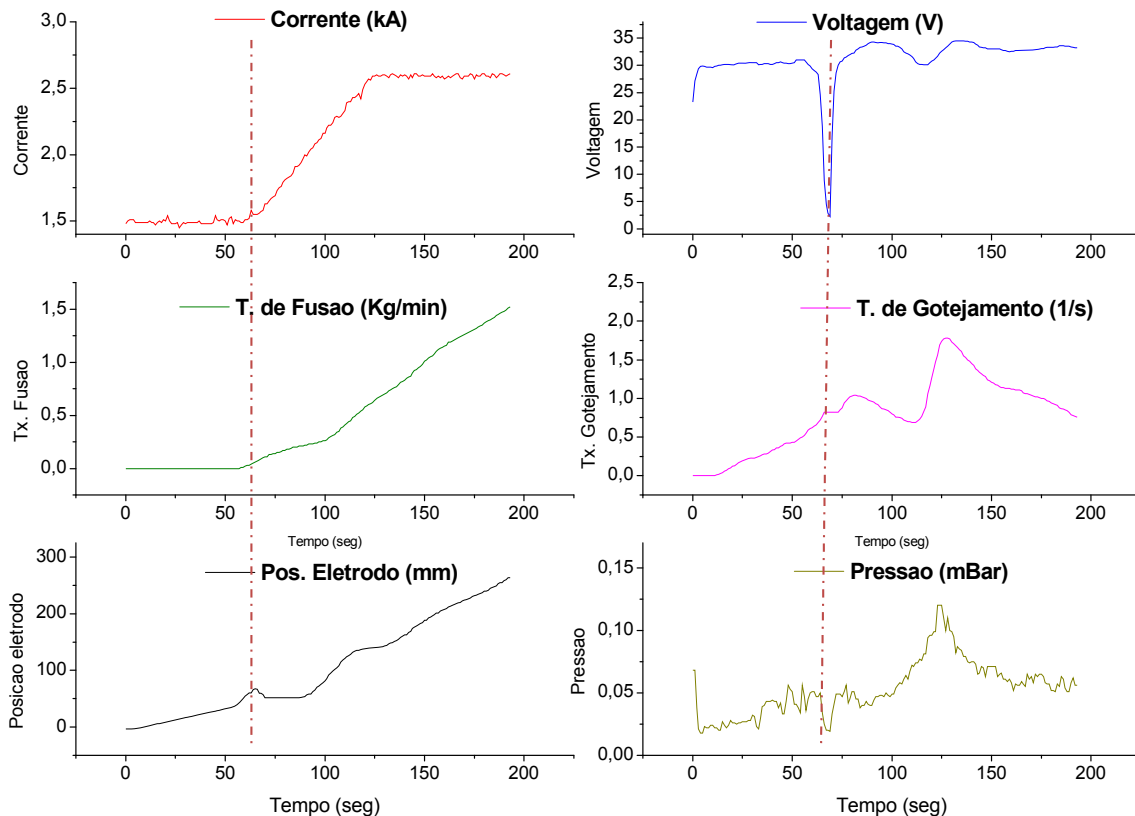


Figura 4. Gráficos de processo RF1. A linha tracejada vertical indica o momento da ocorrência do curto no processo (69 segundos).

A Figura 5 mostra os gráficos relativos a RF2. Na análise da corrente observam-se as etapas de início e de fusão do eletrodo. A análise dos gráficos de corrente e tensão mostrou a ocorrência de uma intermitência entre 220 e 280 segundos de processo, durante a rampa de transição da etapa de iniciação e fusão. Isto é associado à ocorrência de curto-circuito durante a fusão. A observação da taxa de fusão revela que se atingiu um patamar estável após cerca de 500 segundos, quando se completou a transição entre as etapas de iniciação e fusão sem contudo, resultar em extinção do arco elétrico. O gráfico de tensão também apresenta picos e vales em posições específicas (cerca de 410, 640, 800, 960 e 1060 segundos). Tal comportamento também foi observado no gráfico de taxa de gotejamento. Isto é associado aos pontos de união entre os lingotes que compuseram o eletrodo. O mesmo comportamento foi observado e relatado por Mir et al. [3] e Williamson et al. [10]. Essas variações podem levar a bruscas mudanças na taxa de fusão do lingote, podendo afetar a estrutura de solidificação do mesmo e as consequentes propriedades. Contudo, apesar da observação de tais variações na tensão e taxa de gotejamento, esse comportamento não foi significativo na taxa de fusão, conforme apresentado na Figura 6. Para o lingote primário, obtido após RF1, apesar do mesmo também ser composto de briquetes unidos por soldagem, tal comportamento não pode ser claramente observado nos gráficos de tensão ou taxa de gotejamento.

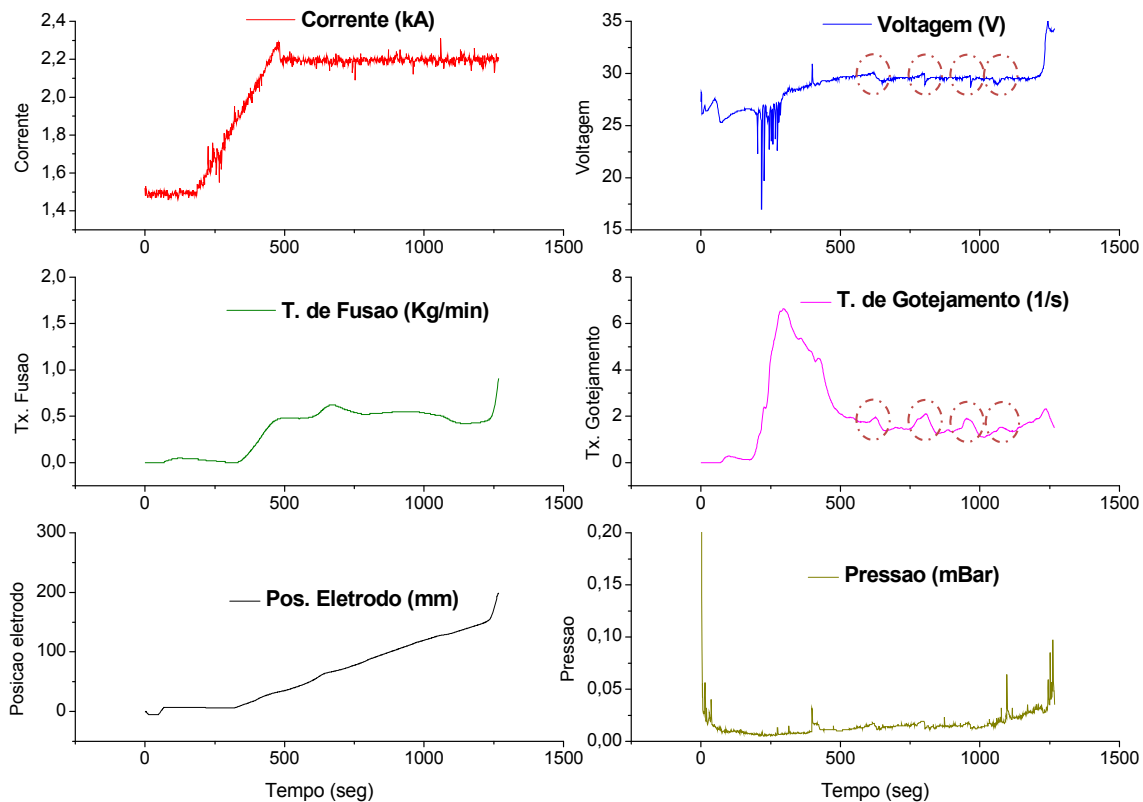


Figura 5. Gráficos de processo RF2. Os círculos tracejados nos gráficos de voltagem e taxa de gotejamento marcam os pontos de união entre os lingotes que compuseram o eletrodo.

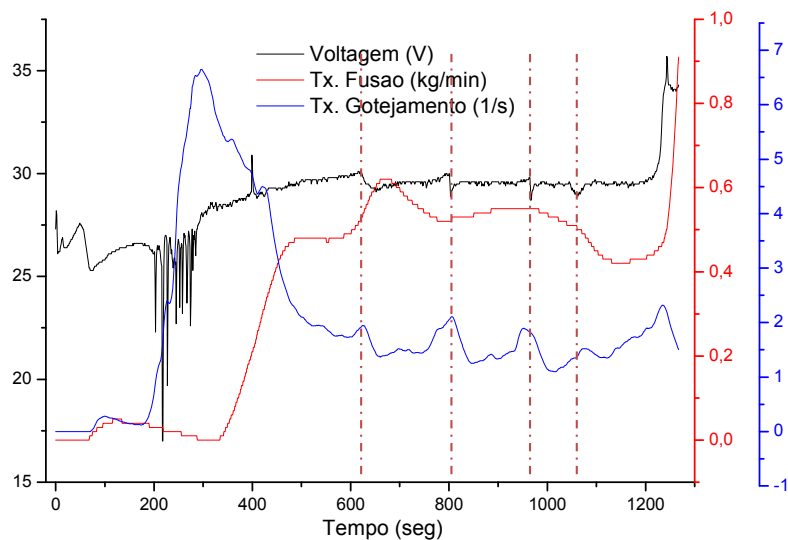


Figura 6. Detalhe das curvas de voltagem, taxa de gotejamento e taxa de fusão do eletrodo produzido a partir dos lingotes. As linhas demarcam os pontos união entre os lingotes que compunham o eletrodo.

A Figura 7 mostra a comparação entre uma das refusões RF1e RF2. O primeiro ponto a notar é o tempo muito mais curto da fusão primária. Isso pode ser explicado pela maior taxa de fusão obtida, em função da corrente usada na etapa de fusão primária, a maior diferença entre o diâmetro do eletrodo - cadinho para a fusão primária (60 e 120 mm) em relação a fusão secundária (119 e 150 mm) e pela diferença na densidade menor dos briquetes em relação a densidade do lingote (5,4

contra $6,5 \text{ g/cm}^3$). O trabalho de Williamson et al [10] mostra que a taxa de fusão pode ser estimada pela Equação (1):

$$\dot{M} = \frac{\rho_L A_e V_{ram}}{1 - \frac{A_e}{A_l}} \quad (1)$$

onde \dot{M} é a taxa de fusão A_e e A_l são as áreas transversais do eletrodo e lingote, respectivamente, ρ_L é a densidade do líquido e V_{ram} é a velocidade do braço que movimenta o eletrodo.

Em RF2, tanto a taxa de gotejamento quanto a taxa de fusão apresentaram variações durante a transição das etapas de iniciação para a etapa de fusão. Porém adquiriram caráter razoavelmente estável até o fim do processo. Tal fato é importante para a obtenção de um lingote com estrutura de solidificação sem defeitos e com consequente estabilidade de propriedades.

Com relação à pressão de vácuo, RF2 apresentou menores valores e foi mais estável que no primeiro caso (eletrodo de briquetes). Isto denota o efeito benéfico de primeira refusão (RF1) na consolidação e purificação da liga. Além disso, deve-se considerar que os eletrodos de briquetes possivelmente apresentavam impurezas entre os grãos compactados, as quais durante o processo de refusão eram liberadas parcialmente na forma de gases.

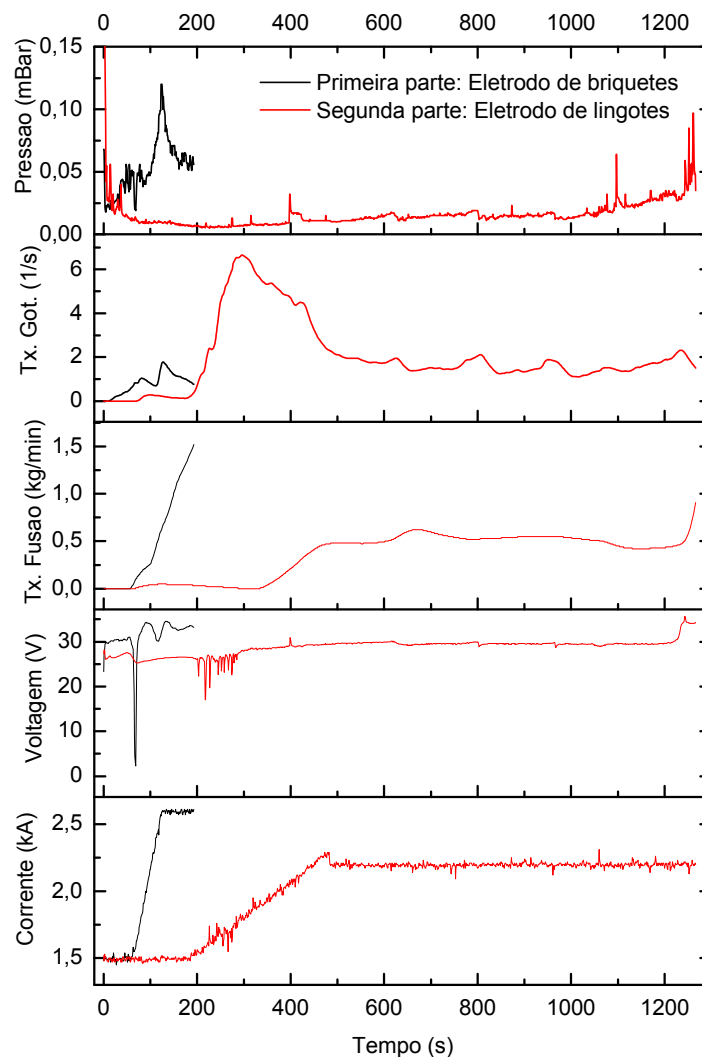


Figura 7. Comparativo entre a primeira e segunda etapas de refusão.

4 CONCLUSÃO

Por meio de processamento da matéria prima, refusão e dupla refusão a arco em vácuo foi possível observar a viabilidade da produção de um lingote de zircônio a partir de particulados de zircônio esponja compactados em briquetes. A análise do processo mostra que a primeira refusão (RF1), a qual tem como ponto de partida o material compactado, se deu de forma mais irregular, com a ocorrência de eventos que, potencialmente, poderiam influir na qualidade do lingote produzido e, conseqüentemente, no produto final. O processo de segunda refusão (RF2) ocorreu de maneira bem mais estável, além de aumentar o grau de limpeza da liga, visto nos menores valores de pressão da câmara do forno. Por meio da observação dos parâmetros de processo também foi possível evidenciar variações referentes aos pontos de união entre as partes que compuseram os lingotes, porém, sem efeitos significativos na taxa de fusão do processo, o que denota que a estrutura de solidificação não deve ter sido significativamente afetada.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao apoio financeiro da FINEP, CNPq e financeiro e institucional das Indústrias Nucleares do Brasil no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Mucsi CS. Prensados de Zircaloy e Estudo do Sistema Dinâmico do Arco Elétrico. Universidade de São Paulo, 2005.
- 2 Williamson RL, Beaman JJ, Melgaard DK. Optimal Filtering Applied to the Vacuum Arc Remelting Process. n.d.
- 3 Mir H El, Jardy A, Bellot J-P, Chapelle P, Lasalmonie D, Senevat J. Thermal behaviour of the consumable electrode in the vacuum arc remelting process. *J Mater Process Technol* 2010;210:564–72. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.008.
- 4 Zanner FJ. Metal transfer during vacuum consumable arc remelting. *Metall Trans B* 1979;10:133–42. doi:10.1007/BF02652456.
- 5 Melgaard DK, Williamson RL, Beaman JJ. Controlling remelting processes for superalloys and aerospace Ti alloys. *JOM* 1998;50:13–7. doi:10.1007/s11837-998-0372-9.
- 6 Chidambaram R, Banerjee S, editors. *Materials Research: Current Scenario and Future Projections*. Allied Publishers Pvt. Limited; n.d.
- 7 Choudhury A. *Vacuum Metallurgy*. Primeira. Materials Park: ASM International; 1990.
- 8 Williamson RL, Schlienger ME, Hysinger CL, Beaman JJ. Modern Control Strategies for Vacuum Arc Remelting of Segregation Sensitive Alloys. *Superalloys 718, 625, 706 Var Deriv* 1997:37–46. doi:10.7449/1997/Superalloys_1997_37_46.
- 9 Donachie MJ, Donachie SJ. *Superalloys a technical guide*. ASM International; 2002.
- 10 Williamson RL, Beaman JJ, Melgaard DK, Shelmidine GJ, Tubesing PK, Aikin Jr. RM. Dynamic melt rate control on a laboratory scale VAR furnace without load cell feedback - Relatório LA-UR-01-4909. n.d.