

SIMULAÇÃO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM TROCADOR DE CALOR CERÂMICO

Sérgio Scuotto (2); Paulo E. B. Mello (2); Lucas B. Parra (2); Gustavo H. B. Donato (2); Fernando S. Ortega* (1)

(1) Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI (FEI)

(2) Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Universitário da FEI (FEI)

*Av. Humberto de A. Castelo Branco, 3972, S. Bernardo do Campo – SP
CEP 09850-901 ferortega@fei.edu.br

RESUMO

O uso de trocadores de calor tem despertado grande interesse para a operação de turbinas a gás a partir da queima de biomassa e combustíveis fósseis, já que possibilita o uso de gases aquecidos e limpos, causando menor dano à turbina. No entanto, para operar acima de 800°C é necessário usar trocadores de calor cerâmicos. Este trabalho apresenta a concepção, simulação numérica do desempenho e do comportamento termomecânico, construção e avaliação experimental em bancada de testes de um trocador de calor de alumina. Os resultados apontam para uma boa correlação entre o desempenho simulado e o experimental. No aspecto termomecânico, verificou-se a presença de trincas severas ao fim dos testes, fato este não previsto nas simulações. O progressivo acúmulo de danos no decorrer dos testes de desempenho térmico e o uso de valores grosseiramente estimados para propriedades difíceis de avaliar experimentalmente estão entre as prováveis causas deste comportamento.

Palavras-chave: Trocador de calor, alumina, comportamento termomecânico.

INTRODUÇÃO

Energia, considerada nas suas mais variadas formas, sempre pode ser vista como uma fonte de riqueza e procedimentos para obtê-la de forma eficiente ou para evitar seu desperdício são metas intensamente buscadas pela ciência, mais

especificamente pela engenharia. Em se tratando de consumo de energia, uma boa parte do calor necessário para determinados processos industriais é desperdiçada devido à baixa eficiência desses processos. O uso de trocadores de calor capazes de recuperar parte desse calor desperdiçado traria ganhos de eficiência significativos, aumentando a eficiência destes processos. Os ciclos denominados *externally fired combined cycle* (EFCC) e *externally fired gas turbine* (EFGT) apresentam-se como uma alternativa capaz de aumentar a eficiência de máquinas térmicas, ao combinarem uma turbina a gás com um ciclo a vapor em uma configuração na qual a queima de combustível é feita em uma câmara externa ⁽¹⁾. Neste arranjo, os gases produzidos na queima de combustíveis fósseis ou de biomassa não passam pela turbina, evitando sua rápida deterioração. No entanto, para serem exequíveis, tais ciclos requerem o uso de trocadores de calor capazes de operar em temperaturas elevadas, tipicamente superiores a 800 °C, o que só é possível com o uso de materiais cerâmicos. A Figura 1 apresenta uma proposta de trocador de calor cerâmico (TCC) construído com a união de placas aletadas justapostas, ao longo das quais ocorrem os fluxos de gás quente e frio, alternadamente ⁽²⁾.

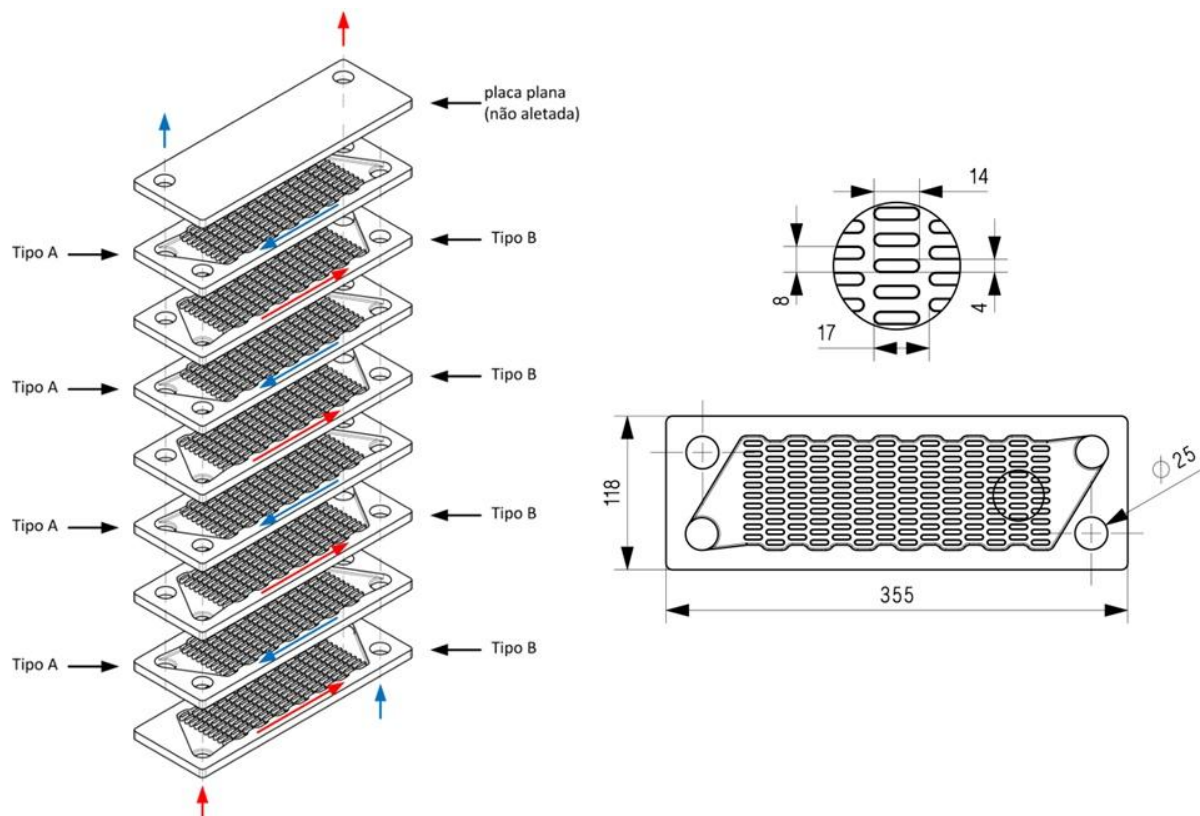


Figura 1 – Vista explodida do trocador de calor cerâmico e detalhes das dimensões de cada placa usada em sua construção. Dimensões em mm.

Este arranjo possibilita a transferência de energia térmica de um gás aquecido pela queima de combustíveis fósseis, ou de biomassa, geralmente contendo gases corrosivos e cinzas, para um fluxo de ar limpo, que posteriormente será conduzido para a turbina a gás.

Apesar do grande interesse tecnológico, são ainda escassos na literatura trabalhos descrevendo a construção de tais trocadores de calor ⁽³⁾. Assim, este trabalho apresenta a concepção, simulação numérica do desempenho e do comportamento termomecânico, construção e avaliação experimental em bancada de testes de um trocador de calor construído de alumina.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do trocador de calor, inicialmente foram moldadas as placas aletadas utilizando-se o processo *gelcasting* ⁽⁴⁾ e, para tal, confeccionou-se um molde com o negativo da peça a ser conformada. A figura 2 apresenta uma imagem do molde, constituído de várias partes móveis fixadas por encaixes e parafusos, fabricados em alumínio 7075 por usinagem em fresadora CNC. As cavidades das aletas possuem um ângulo de saída de 5° para facilitar a desmoldagem e as superfícies do molde foram recobertas com uma fina camada de teflon.



Figura 2 – Vista do molde usado na construção das placas aletadas. As aletas possuem um ângulo de saída de 5° e as superfícies escuras estão recobertas com teflon.

A suspensão usada na moldagem das peças foi preparada utilizando-se dois tipos de alumina (87% de TPF-II, da Elfusa e 13% de CT-3000 SG, da Almatís), resultando em uma distribuição granulométrica próxima ao modelo de Andreasen com coeficiente $q = 0,37$. Com esse ajuste foi possível atingir uma concentração de sólidos de 58% em volume e viscosidade aparente próxima de 0,8 Pa·s (medido a uma taxa de cisalhamento de 15,4 s⁻¹), para uma concentração de dispersante (Dispex N-40) de 1,8%P em relação à massa de pó. O meio líquido usado foi uma

solução aquosa contendo 20% em peso de hidroximetilacrilamida (Aldrich). Após a adição de um iniciador químico (persulfato de amônio, solução aquosa a 10% P) e catalisador (N, N, N', N' tetrametiletilenodiamina) a suspensão foi vertida no interior do molde onde ocorreu a polimerização, gelificando a peça. Após 30 minutos, o molde foi aberto e a placa aletada removida do molde. A secagem ocorreu inicialmente por 3 horas em solução aquosa de polietilenoglicol (40% P) pelo processo de osmose ⁽⁵⁾. Em seguida cada placa foi lavada em água corrente e seca a temperatura ambiente (24 horas) e a 80°C (24 horas). As placas secas foram sinterizadas a 1600°C por 2 horas, após permanecer em um patamar a 500°C durante o aquecimento para a remoção dos componentes orgânicos. O TCC foi finalmente montado unindo-se as peças de cerâmica com uma argamassa refratária sílico-aluminosa (CP 234, CEROX) e posteriormente aquecendo o conjunto até 1200 °C para a obtenção de uma ligação cerâmica entre as placas.

O mesmo processo foi usado para confeccionar barras de seção transversal retangular (72 x 10 x 7,5 mm³) que foram utilizadas para ensaios de flexão em 4 pontos em temperaturas de 23, 210, 425, 700 e 850°C, em uma máquina universal de ensaios MTS 810. Aplicou-se velocidade de carregamento de 0,5 mm/min, com corpos-de-prova retificados carregados em flexão de 4 pontos, conforma a norma ASTM C1211-2009 ⁽⁶⁾. A figura 3-a mostra alguns corpos-de-prova rompidos, mostrando que a fratura ocorreu na região entre os apoios superiores do dispositivo de ensaio, o qual foi construído especialmente para este trabalho de pesquisa, em super liga de Ni-Cr (Inconel 600) e mecanismo de auto-compensação com 3 graus de liberdade (Figura 3-b), permitindo um contato uniforme entre os roletes e a superfície dos corpos-de-prova (Figura 3-c). Após os ensaios, mediu-se a densidade aparente das amostras rompidas, pelo método de Arquimedes (ASTM C373) ⁽⁷⁾.

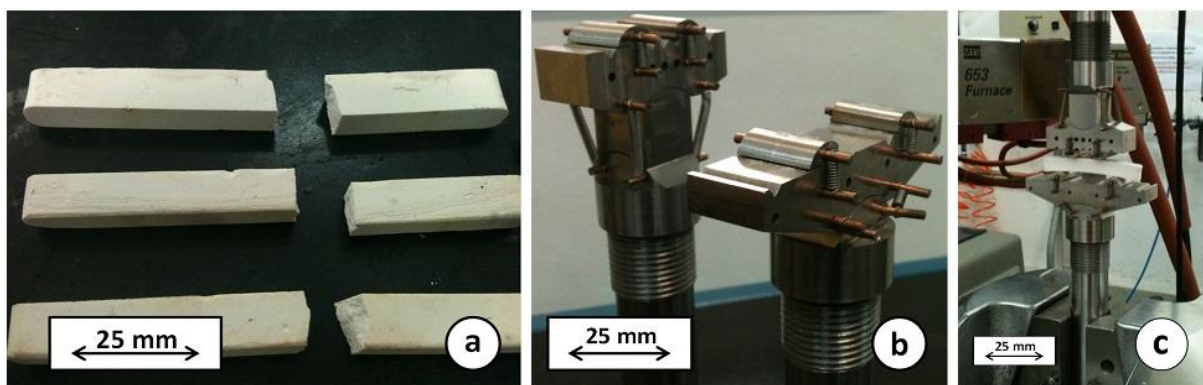


Figura 3: (a) Corpos de prova de alumina retificados e fraturados após os ensaios (dimensões de ensaio: largura = 7 mm; altura = 8 mm; comprimento = 70 mm), (b) dispositivo de ensaio e (c) dispositivo durante ensaio em temperatura ambiente (23 °C).

Com o objetivo de obter uma estimativa da distribuição de tensões no trocador de calor durante a operação, fez-se, inicialmente, uma simulação CFD da

distribuição de temperatura nas paredes da peça. Nesta etapa, utilizou-se uma configuração geometricamente simplificada do trocador de calor, na qual foram retiradas as aletas das placas, reduzido pela metade o número de placas e retirados pequenos raios de arredondamento. Se estas simplificações não fossem realizadas, a malha de cálculo teria um número excessivo de volumes inviabilizando a obtenção de um resultado com os recursos computacionais disponíveis. A malha construída para esta simulação é mostrada na figura 4, juntamente com a distribuição de temperatura nas paredes.

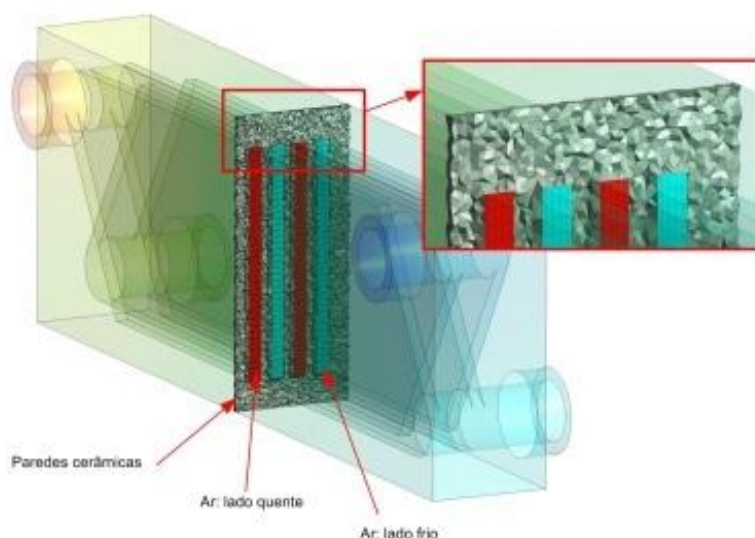


Figura 4: Malha utilizada na simulação CFD da transferência de calor conjugada: determinação da distribuição de temperatura no material cerâmico. Volumes tetraédricos são utilizados nas paredes sólidas.

Posteriormente, a distribuição de temperatura nas paredes foi usada como carregamento para a simulação estrutural do trocador de calor cerâmico. Nesta etapa, utilizou-se o valor de tensão de ruptura avaliado experimentalmente no item anterior, além de valores de módulo de Young estimados a partir do mesmo ensaio. Não foram avaliados o coeficiente de dilatação térmica nem a condutividade térmica, de modo que os valores desses parâmetros foram estimados a partir de dados da literatura e da porosidade do material.

A bancada de ensaios foi projetada e construída no Centro Universitário da FEI (figura 5-a) e é vista na figura 5-b. As linhas de ar frio e quente, bem como os componentes de união (cotovelos e luvas) foram construídas em aço inoxidável 304. O escoamento do ar foi promovido com ventiladores radiais (200 W, vazão máxima de 85 l/s, VENTISILVA). O aquecedor de ar foi constituído de uma resistência elétrica de 1,8 Ω , de Kantal A1, fabricada pela Energy Resistências Industriais especialmente para este projeto, a qual foi instalada dentro de um tubo de alumina (CEROX) de 25 mm de diâmetro interno, 36 mm de diâmetro externo e comprimento

de 700 mm. Esse conjunto (resistência elétrica mais o tubo de cerâmica) foi envolvido por um tubo de aço inoxidável 304, de 100 mm de diâmetro interno e comprimento de 800 mm, com roscas BSP nas duas extremidades e dois furos longitudinais de diâmetro 16,2 mm para encaixe dos isoladores de cerâmica, tendo as extremidades fechadas com duas tampas roscadas e furadas no centro. Nesses furos foram soldados os dois tubos de aço inoxidável de 3/4" que conduziram o ar frio para o aquecedor e o ar já aquecido diretamente para o TCC.

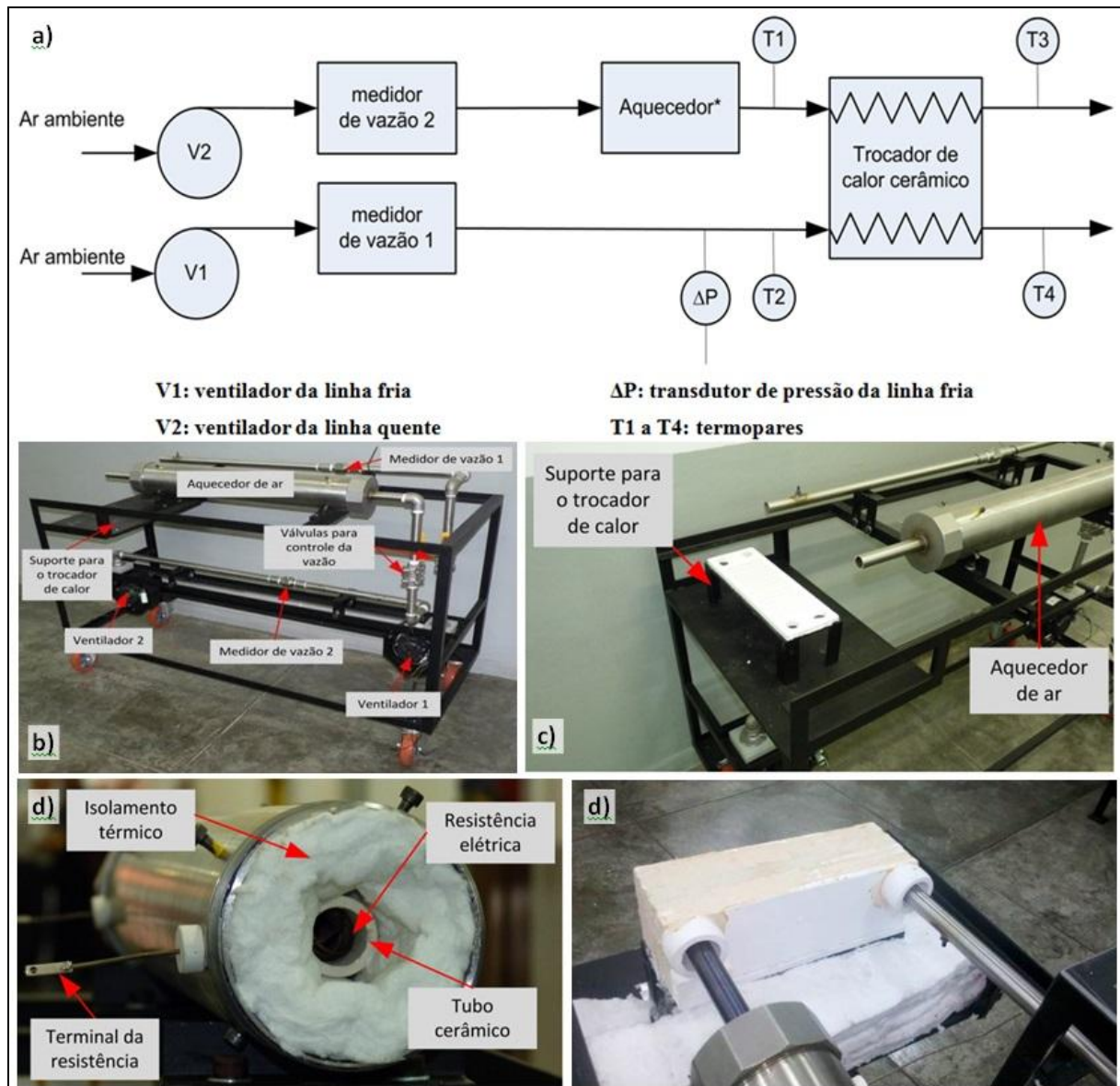


Figura 5 – a) Esquema da bancada de testes, ilustrando detalhes no sistema de aquisição de dados; b) Bancada experimental com linhas de ar quente e ar frio, ainda sem o TCC; c) Extremidades das linhas quente e fria e suporte para o TCC; d) Aquecedor, com a resistência elétrica, o tubo cerâmico, o isolamento de fibra cerâmica, o tubo de 100 mm, os dois isoladores de cerâmica e os terminais da resistência elétrica; e) Alinhamento entre os tubos das linhas quente e fria e os tubos de admissão dos gases para o TCC, já posicionado na bancada de ensaios.

As figuras 5-c e 5-d mostram esquematicamente a montagem aqui descrita. Entre o tubo de cerâmica e o tubo de aço inoxidável, há um enchimento com material isolante térmico (manta de fibra cerâmica silico-aluminosa da CEROX), conforme a figura 5-d. Testes preliminares com vazão máxima foram executados e verificou-se que, com a montagem descrita, não ocorreram vazamentos nem problemas de interferência por dilatação térmica dos tubos de aço. A figura 5-e mostra o posicionamento relativo entre os tubos das linhas de ar e os tubos de admissão do TCC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6-a mostra detalhes de uma das placas cerâmicas obtidas, após sinterização. Verifica-se que o processo de fabricação permitiu reproduzir todos os detalhes da geometria do molde, incluindo as aletas e os canais de escoamento do gás. Na Figura 6-b observa-se o trocador de calor já montado e submetido à cura da argamassa refratária em temperatura de 1200°C.

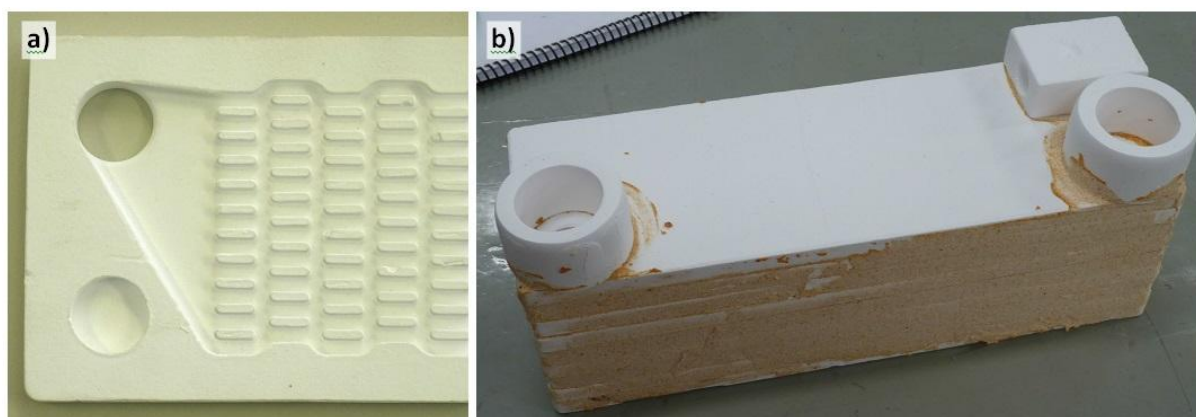


Figura 6 – a) Detalhe de uma placa sinterizada produzidas pelo processo *gelcasting*. b) Trocador de calor cerâmico construído pela sobreposição das placas e união com argamassa refratária.

O limite de resistência à flexão em 4 pontos (σ_{LR-4}) a 700 °C é mostrado na Figura 7-a, sobreposto à respectiva distribuição de Weibull. Fica evidente a boa aderência dos experimentos à distribuição, o que foi observado também nos testes feitos em todas as outras temperaturas estudadas. A partir dessas distribuições foram determinados os valores de resistência característica (σ_{LR-0}) e módulo de Weibull (m) para cada temperatura. A compilação destes parâmetros é apresentada na Figura 7-b, a qual mostra um comportamento de interesse central ao projeto, que é uma queda de 41% na resistência característica da alumina a partir de 425 °C, atingindo 17,7 MPa em 850 °C. Considerando 1% de probabilidade de falha da alumina, a tensão limite de resistência por exemplo a 700 °C (temperatura típica de operação do trocador de calor) é reduzida para $\sigma_{LR-4-1\%} = 12,2$ MPa.

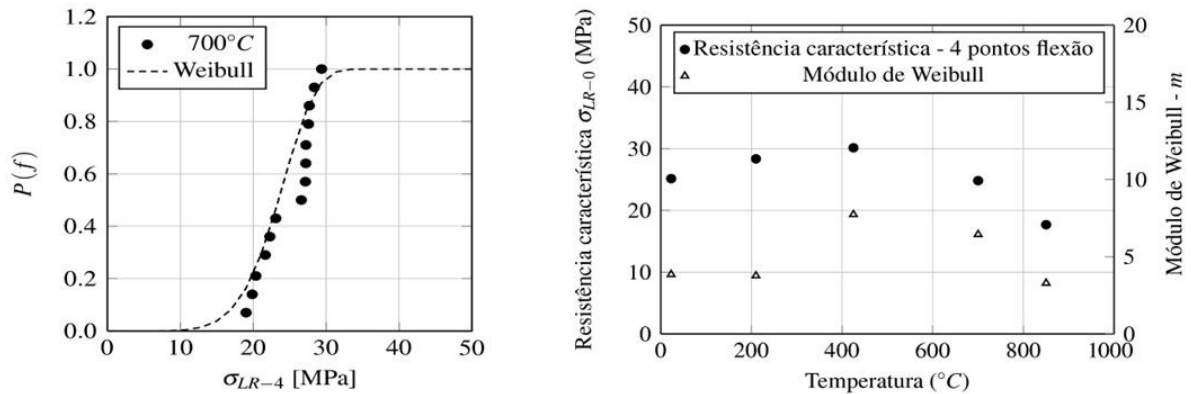


Figura 7: Resultados experimentais de flexão em 4 pontos sobrepostos às respectivas distribuições de Weibull para (a) 700 °C e (b) compilação de resultados de resistência característica (σ_{LR-0}) e módulo de Weibull (m) para cada temperatura.

A figura 8 mostra os resultados de um ensaio típico efetuado com o trocador de calor, informando a evolução da temperaturas em função do tempo. A temperatura de entrada do fluido frio no TCC, $T_{f,e}$, foi assumida como a temperatura ambiente e seus valores durante todo o trabalho não oscilaram mais que 2 °C. Neste teste mostrado na Figura 8, até $t = 2$ horas a vazão do fluido frio foi mantida relativamente baixa (2 m³/h) de modo a aquecer as paredes do TCC e atingir o regime permanente mais rapidamente. Após aquele tempo, a vazão do fluido frio foi aumentada para 5,05 m³/h. Para o fluido quente, a vazão foi mantida sem variação em 6,1 m³/h, de modo a se obter o mesmo número de Reynolds para os respectivos escoamentos. Se a vazão variasse, a temperatura $T_{q,e}$ variaria juntamente com o número de Reynolds Re_q .

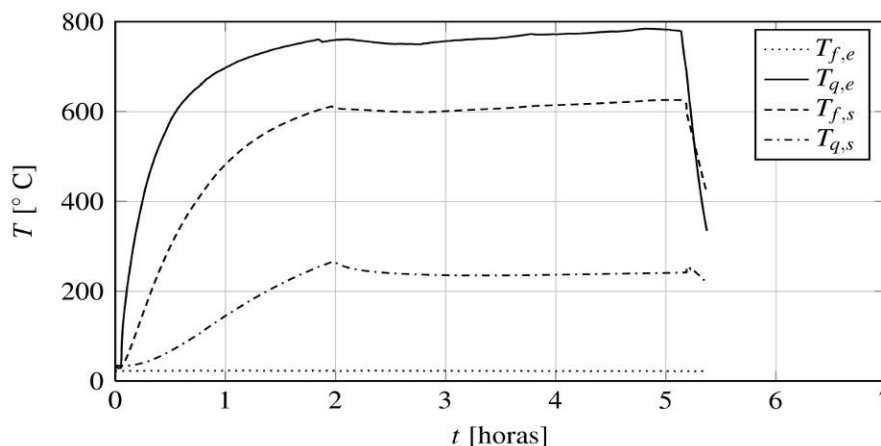


Figura 8 – Curva característica mostrando a evolução da temperatura em função do tempo para um dos testes realizados neste trabalho.

Os dados de temperatura e vazão obtidos com os experimentos foram usados para a obtenção do número de Reynolds, efetividade do trocador de calor, coeficientes de transferência de calor por convecção (em cada lado) e fator de

Colburn ⁽²⁾. A Figura 9 apresenta os valores do coeficiente de Colburn (j) e do fator de atrito (f) em função do número de Reynolds obtidos experimentalmente (representados pelos símbolos no gráfico) e através de simulação CFD. Os detalhes do cálculo de tais parâmetros são omitidos neste trabalho, mas podem ser verificados em detalhes no trabalho de Scutto ⁽⁸⁾.

O fator de atrito é fortemente influenciado pela queda de pressão, mas também é dependente das temperaturas medidas devido às grandes variações nas propriedades termofísicas do ar no interior do trocador de calor. A influência da temperatura sobre as propriedades termofísicas foi avaliada usando o software EES.

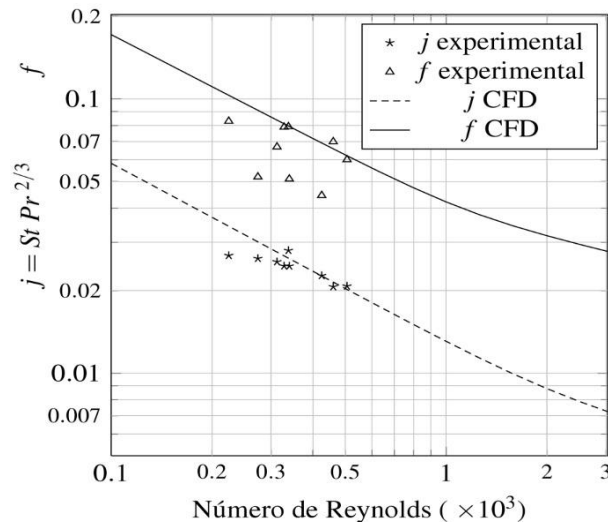


Figura 9 – Curvas comparativas entre os resultados numéricos (CFD) e os resultados experimentais obtidos no trocador de calor cerâmico.

A concordância entre as simulações e os experimentos é bastante satisfatória para o fator de Colburn, mas não para o fator de atrito. Acredita-se que o maior espalhamento dos dados referentes ao fator de atrito (f) deve-se ao uso de transdutores de pressão inapropriados para a faixa de vazão obtida (fundo de escala de 70 mbar) para as medidas efetuadas (0,37 a 0,89 mbar). Novos experimentos estão sendo atualmente conduzidos usando-se transdutores de pressão mais adequados e ar comprimido no lugar de ventiladores para aumentar a velocidade de escoamento dos gases. Os dados obtidos permitiram avaliar a efetividade do trocador de calor, que relaciona seu desempenho com o de um trocador de calor ideal (com área de transferência tendendo a infinito, para o qual a efetividade é igual a 1.0). Os valores obtidos variaram entre 0,79 e 0,84.

Durante os ensaios (Figura 10-a) houve um monitoramento constante do TCC quanto a vazamentos, tanto em seu corpo quanto nas junções com as linhas de ar quente e frio, verificado indiretamente através da análise dos dados de diferença de pressão adquiridos durante os ensaios. Em nenhum momento registrou-se valores não conformes com o desempenho esperado do TCC.

Após os ensaios, o TCC foi retirado da bancada de testes e levado para um exame de sua integridade estrutural. Uma avaliação visual revelou a existência de trincas pequenas (embora visíveis a olho nu) transversalmente ao corpo do TCC. Entretanto, acredita-se que não ocorreram vazamentos de ar significativos através dessas trincas, devido à baixa pressão de operação do TCC (0,9 mbar).

Após o exame visual, uma força foi aplicada manualmente no TCC de modo a avaliar a adesão entre as placas. Sem o uso de ferramentas, foi possível separar a quarta da quinta placa (Figura 10-b), indicando que a união cerâmica deve ser melhorada. Em seguida, um deles foi submetido a um novo esforço manual que foi suficiente para fazer propagar uma das trincas já relatadas, causando uma ruptura no sentido transversal do TCC.

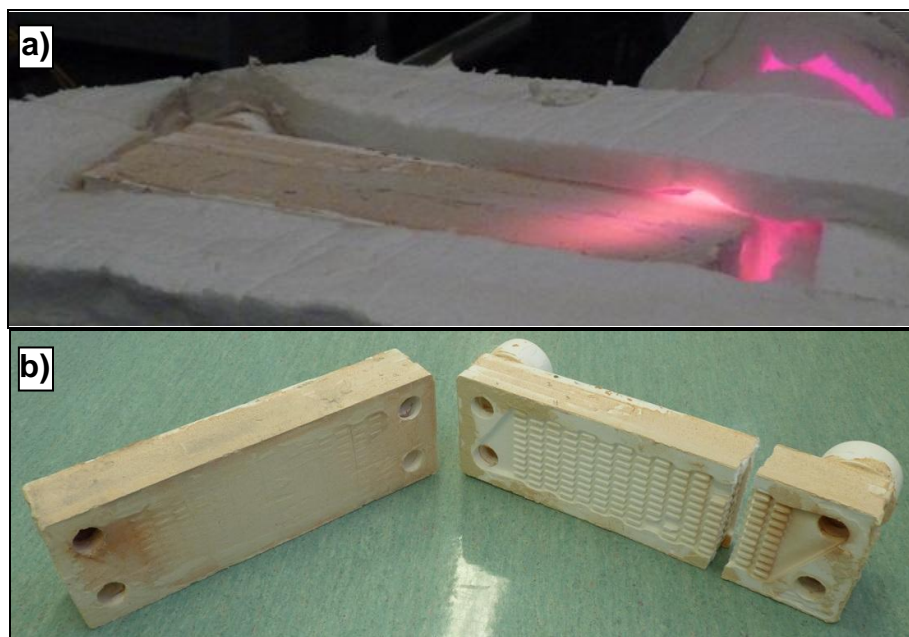


Figura 10: a) TCC em operação à temperatura de 700 °C; b) TCC desmontado após os testes para verificação de eventuais falhas estruturais.

Considerando que o desempenho do material usado na construção de um trocador de calor cerâmico resulta de uma competição entre efeitos antagônicos, ou seja, resistência ao dano por choque térmico (que é favorecida pelo aumento da porosidade e não foi abordada neste estudo) e resistência mecânica (que diminui com o aumento da porosidade e do tamanho de grão), deve-se buscar uma condição de equilíbrio entre essas propriedades. Considerando ainda que o protótipo que foi construído e testado apresentou falhas não apenas no sentido longitudinal (onde a resistência mecânica é controlada pela argamassa refratária usada para promover a união entre as placas), mas também no sentido transversal, fraturando as placas de alumina, fica evidente que este equilíbrio não foi atingido.

Usando a distribuição de temperatura nas paredes obtida por simulação CFD como carregamento para a simulação estrutural, dilatações térmicas não-uniformes

são impostas às paredes do trocador de calor. Isto dá origem a uma distribuição de tensões no material cerâmico. As tensões máximas principais obtidas para a alumina usada no presente estudo são mostradas na figura 11, onde se verifica uma tensão máxima de 10,7 MPa, próximo à entrada do ar aquecido.

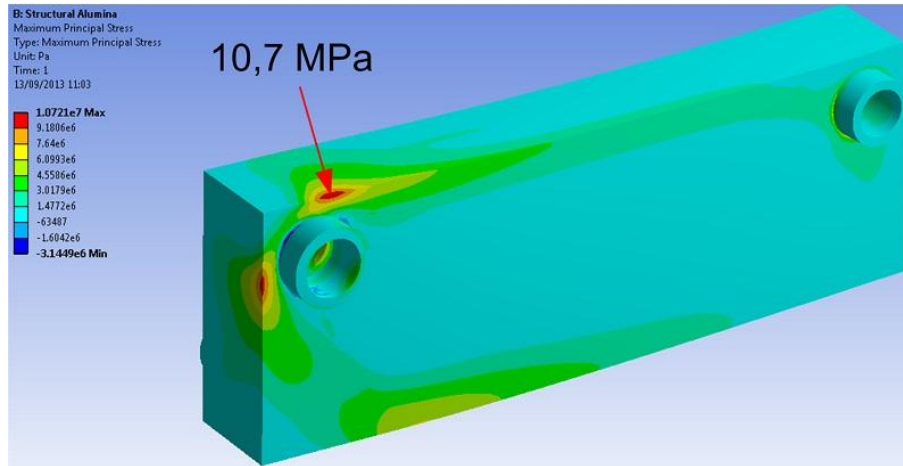


Figura 11 – Distribuição de tensões máximas principais no TCC, obtida como resultado do carregamento térmico estimado pelas simulações CFD. As propriedades mecânicas empregadas (especialmente módulo elástico E , coeficiente de Poisson e de dilatação térmica) foram obtidos da literatura..

A posição da tensão máxima mostrada na figura 11 não corresponde à posição onde o protótipo apresentou trincas. Além disso, a tensão máxima de 10,7 MPa é significativamente inferior à tensão de ruptura medida experimentalmente (25 MPa a 700 °C). Esta simulação fortalece a hipótese de que as trincas formadas no protótipo podem ter sido originadas por choque térmico, ou fadiga térmica, devido aos sucessivos ciclos de aquecimento-resfriamento a que a peça foi submetida.

A simulação foi repetida com as propriedades da alumina densa, cujas propriedades são bem conhecidas na literatura. Neste caso, obteve-se tensão máxima principal de 221 MPa, enquanto a tensão de ruptura deste material é de 267 MPa (redução no coeficiente de segurança). Este expressivo aumento nas tensões é explicado pelo módulo de elasticidade elevado da alumina densa ($E=416$ GPa), resultando em tensões elevadas mesmo para pequenas deformações. O módulo de elasticidade da alumina porosa, medido de forma independente pelo método de excitação por impulso e a partir da curva tensão x deformação, após tratamentos para compensar a deformação da máquina e foram concordantes para valores em torno de 20 GPa.

CONCLUSÕES

O trocador de calor de cerâmico testado apresentou eficácia próxima de 0,8, quando operando em número de Reynolds na faixa de 200 a 500. Este

comportamento está de acordo com as correlações para o fator de Colburn obtidos com simulações de CFD. Os valores de queda de pressão medidos são significativamente menores do que os valores previstos com CFD (correlações de fator de atrito). Diferenças superiores a 20% foram observadas para a queda de pressão. Pelo menos em parte, este desacordo pode ser atribuído ao transdutor de pressão que apresentam maior incerteza para as leituras de pressão mais baixos. Ao fim da bateria de testes, o trocador de calor apresentou danos estruturais devido a tensões originadas pela distribuição de temperatura não uniforme sobre as placas de cerâmica. Este dano apresentou-se na forma de pequenas trincas, que não foram suficientes para causar fugas. A junção das placas utilizando cimento cerâmico não foi suficiente para manter a integridade estrutural da peça.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário da FEI e à Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. Al-Attab K, Zainal Z. Performance of high-temperature heat exchangers in biomass fuel powered externally fired gas turbine systems. *Renewable Energy* 2010;35(5):913-20.
2. de Mello P., Scutto S., Ortega, F.S., Donato G.H.B. Heat transfer and pressure drop in a plate and fin ceramic heat exchanger. In: 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics; 2013 Jun 16-20; Lisbon, Portugal.
3. Schulte-Fischedick J, Dreißigacker V, Tamme R. An innovative ceramic high temperature plate-fin heat exchanger for EFCC processes. *Appl. Therm. Eng.* 2007; 27(8-9):1285-94.
4. Young, A., Omatete, O., Janney, M., Menchhofer, P.. Gelcasting of alumina. *J. Am. Ceram. Soc.* 1991; 74(3):612–618.
5. Trunec, M.. Osmotic drying of gelcast bodies in liquid desiccant. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 31(14):2519 – 2524. 2011
6. ASTM Standard C1211 2009, Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Elevated Temperatures, West Conshohocken: ASTM International, 2009.
7. ASTM Standard C373 2006, Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products, West Conshohocken: ASTM International, 2006.

8. Scutto, S. Trocadores de calor cerâmicos para aplicações em altas temperaturas: uma análise experimental. Dissertação de mestrado. Centro Universitário da FEI, 2013.

SIMULATION, CONSTRUCTION AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF A CERAMIC HEAT EXCHANGER

ABSTRACT

The use of heat exchangers have attracted great interest for the operation of gas turbines from the burning of biomass and fossil fuels, as it enables the use of heated and clean gases, causing minor damage to the turbine. However, to operate above 800 ° C is necessary to use ceramic heat exchangers. This paper presents the design, numerical simulation of the thermomechanical behavior and performance, construction and experimental evaluation of an alumina heat exchanger. The results indicate a good correlation between the simulated and experimental results. In thermomechanical aspect, it was observed the presence of severe cracks at the end of the tests, and this was not predicted by the simulations. The progressive accumulation of damage during the thermal performance tests and the use of roughly estimated values for properties that could not be experimentally assessed are among the possible causes of this behavior.

Keywords: Heat exchangers, alumina, thermomechanical behavior.