

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RAFAEL MISAEL VEDOVATTE

**ESTUDO DA PRESSÃO CAPILAR ENTRE ENVELOPE DO
EVAPORADOR CAPILAR E A ESTRUTURA POROSA CERÂMICA
ANTE MODIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DIMENSIONAIS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2015

RAFAEL MISAEL VEDOVATTE

**ESTUDO DA PRESSÃO CAPILAR ENTRE ENVELOPE DO
EVAPORADOR CAPILAR E A ESTRUTURA POROSA CERÂMICA
ANTE MODIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DIMENSIONAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Freitas Berti

LONDRINA

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia de Materiais



TERMO DE APROVAÇÃO

Estudo da Pressão Capilar do Evaporador Capilar e a Estrutura Porosa Cerâmica
ante Modificação de Parâmetros Dimensionais

Por

Rafael Misael Vedovatte

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 02 de Junho de 2015 ao Curso Superior de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho

APROVADO

(aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

Prof. Dr. Cleberson Cipriano de Paula
(UTFPR)

Profa. Dra. Pollyane Marcia de Souto
(UTFPR)

Prof. Dr. Lucas Freitas Berti
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. De Materiais

Obs.: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Materiais

Dedico este trabalho a Jesus meu Senhor,
que até aqui me sustentou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus que me deu forças e sabedoria para concluir esta etapa.

Aos meus pais, Christine e Rubirval, que não mediram esforços para me ajudar nesta e em todas as etapas de minha vida. Ao meu irmão, Bruno, pelo incentivo e ajuda.

À minha noiva, Vanessa, companheira nesta trajetória que ajudou não só nesta etapa mas em todos os momentos que estivemos juntos.

Ao orientador Lucas Freitas Berti por todo apoio, paciência, conselhos e amizade. Sua experiência foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos que conheci na graduação de Engenharia de Materiais que tornaram este caminho mais fácil e feliz, amigos para vida toda.

*Que os vossos esforços desafiem as
impossibilidades, lembrai-vos de que as
grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.*

(Charles Chaplin)

RESUMO

Vedovatte, R. M, 2015. 61 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso. Estudo da Pressão Capilar entre Envelope do Evaporador Capilar e a Estrutura Porosa Cerâmica Ante Modificação de Parâmetros Dimensionais – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

Este projeto tem como objetivo estudar e determinar a interferência de montagem ideal para um evaporador capilar com estrutura porosa cerâmica de alumina/alumínio fabricada via técnica de sinterização reativa. Será utilizada a técnica da sinterização reativa para a fabricação das estruturas porosas, pois essa técnica é conhecida pela baixa retração das estruturas após a sinterização e melhora nas propriedades mecânicas das estruturas. Em seguida, essas estruturas serão caracterizadas via técnicas da determinação da densidade e porosidade por Arquimedes e Geométrica, resistência de ruptura por flexão em 3 pontos, expansão volumétrica e análise da superfície de fratura. Por fim, as estruturas foram usinadas com diferentes relações de interferência para testes em um Loop Heat Pipe (LHP), com intuito de avaliar a pressão capilar do sistema, por meio do teste do bolhamento. Os resultados revelaram que o aumento da quantidade de alumínio na composição inicial da estrutura porosa leva a um aumento da densidade e da resistência mecânica à flexão pós-tratamento térmico. Além disso, o teste de bolhamento demonstrou que uma relação definida de interferência levou a pressões de trabalho que podem ser utilizadas nos sistemas de troca de calor, essas pressões foram de 40 kPa e 80 kPa.

Palavras-chave: Estruturas porosas cerâmicas, alumina/alumínio, LHP

ABSTRACT

Vedovatte, R. M, 2015. 61 pages. Trabalho de Conclusão de Curso. Study of Capillary Pressure from Capillary Evaporator Envelope and Porous Ceramic Structure over Modifying Dimensional Parameters – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2015.

This project aims to study and determine the optimal mounting interference to a capillary evaporator with porous structure ceramic alumina / aluminum manufactured via reactive sintering technique. It will be used the technique of reactive sintering for the manufacture of porous structures, since this technique is known for low shrinkage after sintering of the structure and improves the mechanical properties of the structures. Then, these structures are identified via techniques of determining the density and porosity by Archimedes and Geometric, flexure 3 point resistance test, volumetric expansion and analysis of the fracture surface. Lastly, the structures are machined with different interference relationship for tests in a Loop Heat Pipe (LHP), in order to assess the capillary pressure of the system, through bubble test. The results show that increasing the amount of aluminum in the initial composition of the porous structure lead to an increase in density and mechanical resistance to bending after thermal treatment, moreover, the bubble test showed that a defined relationship interference led to pressures work that can be used in heat exchange systems, the pressures were 40 kPa and 80 kPa.

Key-words: Porous ceramic structure, alumina/aluminum, LHP

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tubo de calor	20
Figura 2 – Circuito capilar de transferência de calor bifásico (CPL): a) vista superior; b) vista isométrica.....	22
Figura 3 – Circuito de transferência de calor de dupla fase (LHP): a) vista superior; b) vista isométrica.....	23
Figura 4 – Esquemático do evaporador Capilar	24
Figura 5 – Mecanismo RBAO.....	30
Figura 6 – Interferência	32
Figura 7 – Aparato utilizado para obter maiores amostras e Molde	34
Figura 8 – Tratamento térmico das amostras.....	35
Figura 9 – Amostra Pós-Lixamento: a) Vista frontal; b) Vista superior.	36
Figura 10 – Aparato para usinagem	36
Figura 11 – Mecanismos para primeira e segunda fases da usinagem das amostras. a) Posição da Manivela 1; b) Sentido da fresa.	37
Figura 12 – Primeira e Segunda fases das usinagens. a) Posição da Manivela 2; b) Sentido da fresa.	37
Figura 13 – Terceira fase da usinagem das amostras	38
Figura 14 – Método para fixar a estrutura porosa dentro do tubo do evaporador. a) Vista superior; b) Vista frontal da fixação; c) Fixação da estrutura porosa via dilatação térmica.....	39
Figura 15 – a) Montagem teste de bolhamento; b) Momento da bolha	40
Figura 16 – Aparato para Densidade Arquimedes: a) Aparato; b) Aquecimento das Amostras; c) Amostra Imersão	41
Figura 17 – Aparato para o ensaio de flexão de 3 pontos	43
Figura 18 – Aparato para análise da Fratura.....	44
Figura 19 – Diferença Volumétrica das amostras.....	46
Figura 20 – Gráfico de comparação entre a expansão experimental e a teórica	47
Figura 21 – Gráfico de comparação entre as densidades aparentes calculadas por diferentes princípios	48
Figura 22 – Gráfico de comparação entre as porosidades aparentes calculadas por diferentes princípios	50

Figura 23 – Gráfico Tensão de Ruptura X Quantidade de Alumínio	51
Figura 24 – Superfície da Fratura da amostra 90-10: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x	52
Figura 25 – Superfície da Fratura da amostra 80/20: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x	53
Figura 26 – Superfície da Fratura da amostra 70/30: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x	53
Figura 27 – Superfície da Fratura da amostra 60/40: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição pó de Alumina (% em peso)	33
Tabela 2 – Composição pó de Alumínio (% em peso)	33
Tabela 3 – Composição das Misturas em Relação ao Tratamento Térmico.	46
Tabela 4 – Erros Relacionados a Expansão do Volume das Amostras	47
Tabela 5 – Densidade Aparente das Amostras	48
Tabela 6 – Porosidade Geométrica de Cada Amostra	49
Tabela 7 – Porosidade Arquimedes de Cada Amostra	49
Tabela 8 – Resistência a Flexão em Relação ao Teor de Alumínio	50
Tabela 9 – Valor da Pressão Capilar em Relação a Interferência.....	51

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	41
Equação 2	42
Equação 3	42
Equação 4	42
Equação 5	43
Equação 6	43
Equação 7	43
Equação 8	43
Equação 9	45
Equação 10	46

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 JUSTIFICATIVA	17
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	17
1.6 REFERENCIAL TEÓRICO	18
1.7 ESTRUTURA	19
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO CAPILAR.....	19
2.2 ELEMENTOS POROSOS	25
2.3 TÉCNICAS DE SINTERIZAÇÃO REATIVA.....	27
2.3.1 Técnica RBAO.....	29
2.4 INTERFERÊNCIAS	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1. MATERIAIS	32
3.1.1 Elemento Poroso Cerâmico.....	32
3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	33
3.2.1 Misturas das Matérias Primas para Estrutura Porosa	33
3.2.2 Prensagem das Misturas Finais	33
3.2.2 Tratamento Térmico	34
3.2.3 Usinagem das Estruturas Porosas	35
3.3. CARACTERIZAÇÃO	38
3.3.1 Teste do Bolhamento	39
3.3.2 Porosidade e Densidades Geométrica e Arquimedes	40
3.3.3 Tensão de Ruptura a Flexão	42
3.3.3 Análise da Superfície de Fratura	43
3.3.4 Expansão Volumétrica.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45

4.1 RESULTADOS	45
4.1.1 Expansão Volumétrica.....	46
4.1.2 Densidade Aparente.....	48
4.1.3 Porosidade	49
4.1.4 Tensão de Ruptura em Flexão	50
4.1.5 Pressão Capilar	51
4.1.6 Análise da Superfície da Fratura	52
4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
4.2.1 Expansão Volumétrica.....	54
4.2.2 Densidade Aparente Geométrica e Arquimedes	55
4.2.3 Porosidade	55
4.2.4 Tensão de Ruptura a Flexão	56
4.2.5 Pressão Capilar	56
4.2.6 Análise da Superfície da Fratura	57
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1. INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho é determinar um conjunto de interferências usinadas em estruturas porosas cerâmicas, fabricadas via técnica de sinterização reativa para utilização em circuitos bifásicos trocadores de calor. Este trabalho traz a possibilidade de qualificar o uso de estruturas porosas cerâmicas para tal aplicação. Cerâmicas porosas possuem características específicas que colaboram para seu uso em tais sistemas, por exemplo, alta refratariedade e alta resistência a ataques químicos. Isto é interessante para aplicações na área aeroespacial no tocante a trocadores de calor com intuito de refrigeração.

Os sistemas trocadores de calor bifásicos têm sido utilizados para a refrigeração de equipamentos na área aeroespacial. São chamados de bifásicos por trabalharem com duas fases diferentes do fluido de trabalho, por exemplo, fase líquida e gasosa. Outra característica importante é que circuitos de transferência de calor assistidos por bombas capilares não necessitam de bombas mecânicas para movimentação do fluido de trabalho e, portanto, não necessitam de potência elétrica auxiliar para funcionarem (CAMARGO, 2004).

Sendo assim, este trabalho foi motivado pela necessidade de saber a correta interferência para montagem da estrutura porosa no evaporador capilar. Isso é decorrente do fato que o fluido de trabalho é bombeado ao longo de sistemas pelo desenvolvimento da pressão capilar na estrutura porosa e que, portanto, é necessário um valor de interferência ideal para que não haja vazamentos de vapor para a linha de líquido, mas que também seja possível a montagem da estrutura porosa dentro do envelope de metal do evaporador capilar por aquecimento.

O desempenho da bomba capilar nos sistemas bifásicos de troca de calor está relacionado com a interferência entre o tubo do evaporador e a estrutura porosa, a interferência pode ser definida pela diferença, em um acoplamento, entre as dimensões do furo e do eixo.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Diante disso, a delimitação do tema está em analisar o que diferentes relações de interferência entre o tubo e a estrutura cerâmica porosa causam no desempenho do circuito bifásico, que será avaliado indiretamente por um ensaio

específico chamado de teste de bolhamento, o qual fornece o valor da pressão capilar.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

A pergunta que configura o problema de estudo é: De que forma diferentes interferências entre o tubo e a estrutura alteram o desempenho do circuito bifásico, sem que seja impedida a montagem pelo aquecimento do envelope metálico do evaporador?

Espera-se obter uma estrutura porosa cerâmica via sinterização reativa com as propriedades citadas nos objetivos específicos, para que esta seja utilizada em sistemas bifásico de troca de calor. São estas as propriedades: 40-80% de porosidade, 5 a 30 micrometros de tamanho de poros, pressão capilar mínima de 5 kPa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar e determinar a interferência de montagem ideal para um evaporador capilar com estrutura porosa cerâmica.

1.3.2 Objetivos Específicos

Este trabalho visa avaliar a interferência entre a estrutura porosa cerâmica e o envelope de modo que a pressão capilar mínima seja de 5 kPa. Para isso foi necessário obter estruturas porosas cerâmicas produzidas por sinterização reativa para utilização em evaporadores capilares, estruturas com porosidade entre 40 a 80% com tamanhos de poros de 5 a 30 micrometros, permeabilidade darciana entre 10^{-9} e $10^{-11}m^2$; não darciana maior que $10^{-8}m$; pretende-se também obter um evaporador capilar montado com pressão mínima de 5 kPa.

1.4 JUSTIFICATIVA

Há importância em qualificar a utilização de estruturas porosas cerâmicas, com composição final de alumina, fabricadas pela técnica de sinterização reativa para utilização em circuitos bifásicos trocadores de calor, uma vez que são utilizados para refrigeração/isotermalização de equipamentos aeroespaciais. Este sistema pretende atender, então, à demanda gerada por este setor.

Este trabalho faz parte do projeto em desenvolvimento na UTFPR de Londrina e é participante do Programa da Agência Espacial Brasileira Microgravidade no Quarto Anúncio de Oportunidades. O fato da fabricação do *Loop Heat Pipe* (LHP) ser realizada no projeto facilita o acesso às medições necessárias. Além disso, essa tecnologia de construção do LHP só foi realizada por poucos grupos de pesquisa, possibilitando desta forma a qualificação dessa tecnologia para o Brasil.

Este trabalho justifica-se por determinar a melhor relação de interferência entre o tubo e a estrutura porosa para otimizar o desempenho do circuito bifásico. Trará uma contribuição no sentido de que não há trabalhos que utilizam a sinterização reativa para a fabricação do elemento poroso para esta aplicação.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico a fim de obter informações sobre os sistemas de bombeamento capilar, estruturas porosas para utilização em sistemas de troca de calor, técnicas de sinterização e interferências, utilizando livros e pesquisas já realizadas por outros pesquisadores devidamente registrados.

Existem muitas formas de fabricação de estruturas cerâmicas porosas, dentre elas a técnica de sinterização reativa (*reaction bonding technique*, em inglês). Esta técnica foi selecionada para este experimento, pois, permite o projeto da magnitude do valor da retração durante o tratamento térmico da estrutura porosa, fator que é característico dessa técnica de fabricação.

Para a preparação da estrutura porosa cerâmica foram utilizadas técnicas contempladas na disciplina de Metalurgia do Pó, pois, tal metodologia permite alcançar as características desejadas nesse projeto, dentre elas: porosidade e excelente relação entre tolerâncias. Outra razão para a utilização dessa metodologia

de fabricação tem relação com as matérias primas utilizadas serem encontradas na forma de pó.

O tratamento térmico utilizado foi elaborado de acordo com artigos que utilizam a técnica de sinterização reativa para a preparação das amostras, pois o tratamento viabiliza uma baixa ou nenhuma retração em virtude da expansão de uma das matérias primas presentes na preparação, no caso, o Alumínio.

A caracterização das estruturas porosas foi realizada buscando a obtenção de parâmetros de interesse para uso em sistemas de bombeamento capilar.

Densidade via Arquimedes e Geométrica, porosidade, teste do bolhamento, ensaio mecânico de flexão em 3 pontos e análise da superfície da fratura são costumeiramente utilizados para caracterização dessas estruturas porosas, logo, essas técnicas de caracterização também foram empregadas nesse projeto.

1.6 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico para essa pesquisa constitui-se, inicialmente, por grupos de pesquisa que trabalham com sistemas bifásicos passivos de troca de calor, entre eles, os trabalhos do professor Edson Bazzo, Eduardo Reimbrecht, Heitor Camargo, Marcia Mantelli, Kleber Paiva, Vasilev, Maydanik, Jentug KU, Hoang, Gustavo Verdieri e Fernando Tabalipa, e por pesquisadores que abordam a técnica da sinterização reativa para fabricação de estruturas cerâmicas.

Fernando Tabalipa abordou as características e aplicações dos tipos de sistemas bifásicos de troca de calor e características das estruturas porosas. Lucas Freitas Berti e Fernando Tabalipa abordaram em seus trabalhos as características importantes que as estruturas porosas cerâmicas apresentam para a aplicação no LHP. Cerâmicas porosas podem apresentar certas propriedades, como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta área superficial e alta permeabilidade, associadas a características comuns próprias dos materiais cerâmicos, como alta refratariedade e resistência a ataques químicos. Tais características credenciam o uso desses materiais em aplicações tecnológicas como filtragem em altas temperaturas, suportes para catálise, isolamento térmico, implantes ósseos, entre outras (ORTEGA, PAIVAL, *et al.*, 2003) apud (BERTI, 2006). Os trabalhos de Nils Claussen, Rolf Janssen, Lucas Freitas Berti entre outros foram selecionados para

este projeto pois desenvolvem o tema da técnica de sinterização reativa, que será aplicada para fabricação das estruturas porosas.

1.7 ESTRUTURA

Este trabalho está organizado em cinco capítulos:

- O primeiro composto por esta introdução em que é delimitado o projeto de conclusão de curso e os objetivos a serem alcançados com base nas premissas e problemas apresentados.
- No segundo capítulo é realizada a revisão de literatura composta dos temas que dão fundamentação a este projeto, sendo eles, os sistemas de bombeamento capilar, elementos porosos, técnicas de sinterização e interferências.
- No terceiro capítulo é demonstrada a metodologia aplicada para a realização e obtenção dos resultados juntamente com os materiais utilizados no decorrer do projeto.
- No quarto capítulo são expostos e discutidos os resultados consequentes da metodologia proposta e aplicada ao projeto, seguido do último capítulo que apresenta as considerações finais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO CAPILAR

O controle térmico de componentes eletrônicos em satélites de comunicação, sondas espaciais, estações orbitais e em diversas aplicações industriais vem sendo realizado utilizando-se dispositivos de transferência de calor de dupla fase Stenger-1966. Além de Stenger, Ku e Maydanik são os principais contribuidores para o desenvolvimento e aplicação dos sistemas de transferência de calor para aplicações industriais e espaciais.

Tais sistemas apresentam propriedades que os tornam vantajosos em relação aos demais mecanismos de controle térmico, dentre elas: alta condutividade térmica – ou seja, é necessária uma menor diferença de temperatura para transportar calor -, transporte eficiente de calor concentrado e controle da geometria dos componentes visando melhor eficiência de troca de calor (SAIED, 2006).

Esses circuitos foram inicialmente estudados em meados da década de 1960 com objetivo de substituir tubos de calor ou circuitos convencionais de dupla-fase em aplicações que requeiram altas taxas de troca térmica (STENGER, 1966) apud (TABALIPA, 2005).

Assim, a título de ilustração, pode-se tomar como exemplo desses primeiros sistemas para estudo, um tubo de calor (HP – *Heat Pipe*), Figura 1, descrito figurativamente como um pequeno refrigerador com a diferença de que o fluido de trabalho circula por ação dos diferentes valores de pressão capilar presentes ao longo do tubo. Essa variação na pressão capilar se dá pela diferença entre a curvatura dos meniscos situados no evaporador e no condensador (STENGER, 1966).

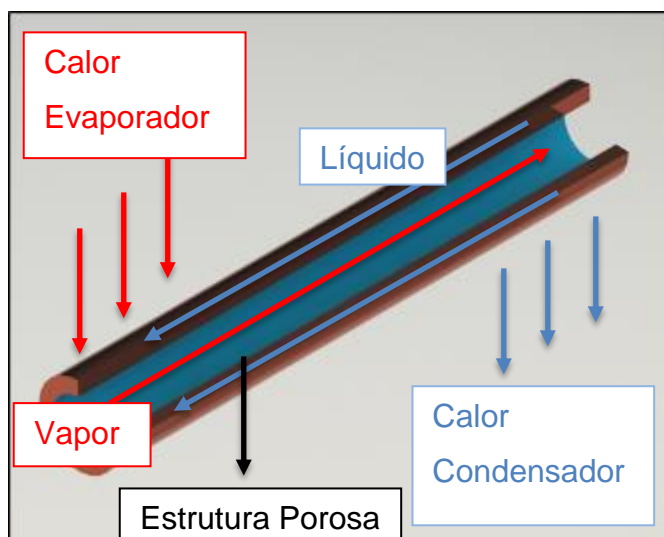


Figura 1 – Tubo de calor
Fonte: Autoria Própria

O funcionamento deste sistema ocorre da seguinte forma: no evaporador, o fluido de trabalho absorve energia térmica e muda de fase. A pressão aumenta forçando o vapor a se mover para o condensador através do centro do tubo. No condensador, o fluido perde calor, condensando-se e retornando ao evaporador por ação capilar (STENGER, 1966).

O trabalho de Heitor Camargo foi selecionado para este projeto pois desenvolve o tema dos sistemas bifásicos de troca de calor de forma que se tornou referência para diversos trabalhos da área. Ao longo do tempo, de acordo com o autor, as necessidades térmicas das aplicações espaciais foram tornando-se maiores e os projetos mais complexos. Para atender tal demanda de energia, faz-se

necessária a instalação de um número cada vez maior de tubos de calor, ou então a instalação de circuitos convencionais de refrigeração, aplicação esta que necessita de potência elétrica externa para bombeamento do fluido de trabalho (CAMARGO, 2004).

Para resolver tais problemas, diversas alternativas construtivas de tubo de calor foram testadas, resultando em duas principais correntes de sistemas bifásicos, os circuitos de bombas capilares (CPL – *Capillary Pumped Loop*) e os circuitos de tubos de calor (LHP – *Loop Heat Pipe*). Ambos apresentam praticamente o mesmo princípio funcional, diferenciando-se somente na concepção e posicionamento do reservatório (CAMARGO, 2004).

Diferente dos tubos de calor nos sistemas de bombeamento capilar, a localização da estrutura capilar é restrita apenas ao evaporador. O restante da tubulação é constituído de tubos lisos, proporcionando menor perda de carga e não impedindo o transporte de calor (KU, 1993) e (MAYDANIK, 2005). Nesses sistemas, as estruturas capilares podem ser constituídas por diferentes materiais e propriedades, como por exemplo, porosidade e tamanho do poro, ambas propriedades interferem diretamente nos valores de pressão capilar do sistema. Outros fatores que também podem ser modificados para buscar melhores desempenhos nos sistemas de troca de calor são o fluido de trabalho utilizado e a interferência que a estrutura porosa tem com o tubo do evaporador.

Assim, circuitos de transferência de calor bifásicos ou dupla fase começaram a representar uma importante alternativa em projetos de refrigeração, por envolverem altas taxas de transferência de calor por evaporação e condensação através de pequenas diferenças de temperaturas, se comparados aos sistemas monofásicos. Ainda tratando das vantagens dos sistemas bifásicos em relação aos sistemas monofásicos, pode-se destacar que os sistemas de dupla-fase são mais compactos, apresentam menores perdas de potencial e operam com maiores coeficientes de troca térmica. Nesses casos, os coeficientes de troca de calor por ebulição/condensação são significativamente maiores que os coeficientes de convecção apresentados pelos sistemas monofásicos (CAMARGO, 2004).

No caso de convecção natural, trocadores de calor envolvendo água como fluido de trabalho apresentam coeficientes entre 0,02 e 0,10 kW/m².K. Para convecção forçada, o coeficiente sobe para valores entre 0,05 e 10 kW/m².K. Já

para circuitos bifásicos, valores entre 3 e 100 kW/m².K são encontrados (STOECKER e JONES, 1985) apud (CAMARGO, 2004);

No caso específico da bomba capilar, há vantagens adicionais relacionadas com seu peso estrutural e completa ausência de vibrações, tornando-a importante alternativa para aplicações espaciais. Outra característica a se destacar é que circuitos de transferência de calor assistidos por bombas capilares não necessitam de bombas mecânicas para movimentação do fluido de trabalho e, portanto, não necessitam de potência elétrica auxiliar para funcionarem (CAMARGO, 2004), fato este que motivou várias pesquisas e estudos nessa área de trabalho.

A utilização de tubos de calor é ainda hoje muito difundida devido sua confiabilidade e robustez, mas apresenta desvantagens significativas relacionadas com a flexibilidade de projeto e quantidade de calor dissipado. Assim, os circuitos de bombas capilares são sistemas de dupla-fase para transporte de calor que, basicamente, possuem como componentes principais um evaporador, um condensador, um reservatório - para os CPLs - e linhas de transporte de líquido e vapor (KU, 1993), conforme pode ser observado no esquema da Figura 2.

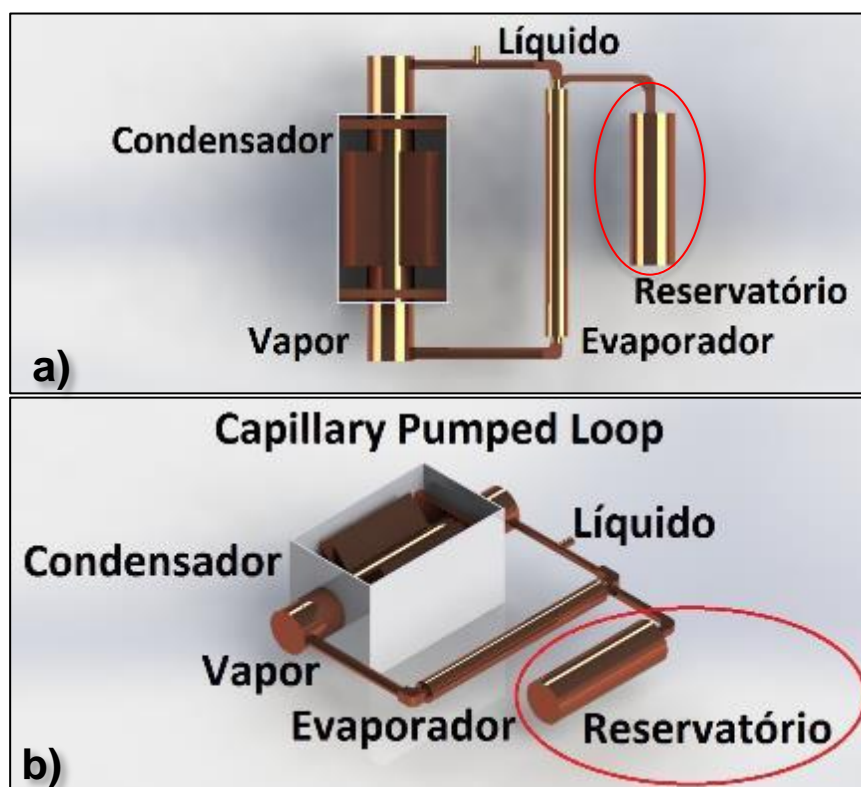


Figura 2 – Circuito capilar de transferência de calor bifásico (CPL): a) vista superior; b) vista isométrica
Fonte: Autoria Própria

De forma semelhante, LHPs, pesquisados sobretudo por Maydanik, possuem a mesma forma de funcionamento dos CPLs ou circuitos de bombas capilares, apresentando como principais diferenças a ausência do reservatório e a existência de uma câmara de compensação na entrada da bomba capilar (TABALIPA, 2005), conforme pode ser observado na Figura 3.

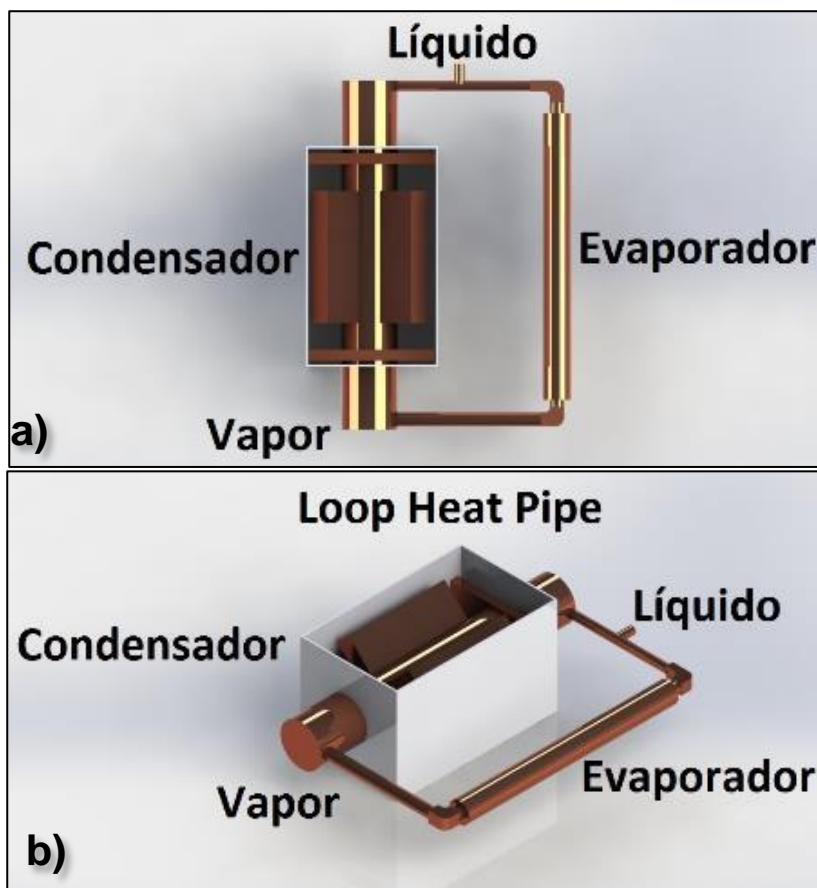


Figura 3 – Circuito de transferência de calor de dupla fase (LHP): a) vista superior; b) vista isométrica
Fonte: Autoria Própria

Baseado no documento¹ enviado à Agência Espacial Brasileira sobre o sistema de funcionamento do LHPs, este ocorre de tal modo que o calor aplicado no evaporador aquece o fluido de trabalho que troca de fase. O vapor é impedido de permear a estrutura porosa devido à formação de um menisco que impede a penetração do vapor na estrutura capilar em direção ao canal de líquido, ou seja, entrada do evaporador.

¹ Documento enviado a AEB explicando o experimento do miniLHP que será realizado na UTFPR Londrina.

Assim o vapor é forçado a mover-se em direção à saída do evaporador em sentido ao dissipador de calor, ou seja, o condensador. O fluido de trabalho, após ser condensado no condensador, é reconduzido ao evaporador por ação capilar. O correto funcionamento do sistema pode ser verificado pelo perfil de temperaturas ao longo do LHP, em que, ao ser aportada uma demanda térmica no evaporador, as temperaturas aumentarão e atingirão um patamar, pois a troca de calor entre o evaporador e o condensador contrabalança o aumento de temperatura.

A capacidade térmica da bomba capilar depende de sua geometria, do fluido de trabalho e da perda de carga ao longo do LHP. Na condição de carga térmica nula não há diferença de pressão na interface entre líquido e vapor do menisco. Nessa condição, admite-se que o menisco apresente uma curva de raio infinito. À medida que aumenta a carga térmica, aumenta a perda de carga no circuito e a diferença de pressão entre o líquido e o vapor, e diminui o raio de curvatura de menisco. No limite em que o raio de curvatura se iguala ao raio do poro ocorre o colapso da bomba capilar, ou seja, esta para de funcionar, (REAY e KEW, 2006).

Quando a queda de pressão excede a capacidade de bombeamento capilar, o vapor penetra na estrutura porosa, reduzindo a permeabilidade da mesma, até o limite em que ocorre o bloqueio do fluxo de líquido. Este bloqueio do fluxo de líquido é chamado de colapso da bomba capilar (REAY e KEW, 2006). Logo, para uma determinada estrutura e um dado fluido de trabalho, existe um limite de carga térmica que o circuito pode transportar. Esse é o chamado limite capilar.

Diferentes tipos de bombas capilares vêm sendo estudados, visando sua aplicação em evaporadores nos circuitos de transferência de calor de dupla fase (BAZZO, GROLL, *et al.*, 1997); (KU, 1993) apud (TABALIPA, 2005), Figura 4.

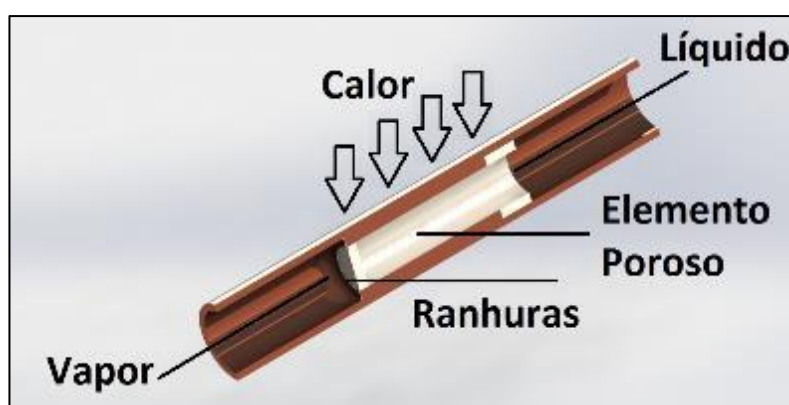


Figura 4 – Esquemático do evaporador Capilar
Fonte: Autoria Própria

Assim, o presente trabalho avaliará a pressão capilar de uma estrutura porosa cerâmica composta por pós de alumina-mulita/alumínio fabricada por sinterização reativa, como proposta de estrutura porosa em uma bomba capilar de um sistema LHP com água sendo o fluido de trabalho.

2.2 ELEMENTOS POROSOS

Atualmente vários materiais podem ser utilizados como elementos porosos para aplicação em sistemas de troca de calor. O design, as características estruturais e o material escolhido interferem diretamente no desempenho desses sistemas.

Neste contexto, cerâmicas porosas podem apresentar certas propriedades como baixa densidade, baixa condutividade térmica, alta área superficial e alta permeabilidade, associadas a características comuns próprias dos materiais cerâmicos, como alta refratariedade e resistência a ataques químicos que credenciam o uso desses materiais em aplicações tecnológicas como filtragem em altas temperaturas, suportes para catálise, isolamento térmico, implantes ósseos, entre outras (ORTEGA, PAIVAL, *et al.*, 2003) apud (BERTI, 2006).

As propriedades dos elementos porosos podem ser inicialmente ajustadas com a escolha da matéria-prima e da técnica de fabricação a ser empregada. A distribuição de tamanho de poros pode, por exemplo, ser controlada dentro de limites estreitos, mantendo 90% dos poros como tamanho médio considerando uma variação de $\pm 10\%$ (NICHOLAUS e RAY, 1970) apud (TABALIPA, 2005). Muitos fatores são decisivos nas propriedades de materiais cerâmicos porosos, entre eles o tamanho e a forma do grão.

Pode-se definir elemento poroso como uma estrutura que tem a porosidade como principal característica. Elementos porosos possuem uma ampla variedade de aplicações industriais, tais como na indústria aeroespacial, automotiva, biotecnológica, de processos químicos, de processamento de alimentos, de equipamentos de laboratório, farmacêutica, nuclear e petroquímica (TABALIPA, 2005).

Os materiais porosos são de interesse significativo devido às suas largas aplicações em catálises, separação, materiais estruturais de pouco peso, biomateriais entre outros (TABALIPA, 2005).

Conforme (DELIL 2002; MAIDANIK et al. 1992 e KROLICCZEK e BRENNAN, 1985 apud (TABALIPA, 2005), materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos, tais como níquel, aço inoxidável, titânio, alumina, sílica, quartzo, politetrafluoretileno (PTFE) polietileno vêm sendo utilizados para a produção de estruturas porosas empregadas em sistemas de bombeamento capilar.

Segundo (KU, 1993) apud (BERTI, 2006), os materiais poliméricos foram os primeiros a serem empregados em bombas capilares. Por sua vez, os materiais metálicos surgiram como uma opção por possuírem a vantagem de apresentar um limite de bombeamento capilar maior que os materiais poliméricos. Por outro lado, deve-se atentar ao fato de que materiais metálicos demandam uma fabricação mais refinada se comparada aos demais materiais utilizados para tal aplicação, isso agrega mais custos para a utilização desse tipo de estrutura porosa.

Sendo assim, materiais cerâmicos têm sido desenvolvidos nos últimos anos para a aplicação em sistemas de bombeamento capilar. Testes com elementos porosos de óxido de alumínio demonstraram bons resultados combinando baixa condutividade térmica e boa molhabilidade pelos fluidos de trabalho. A alumina (Al_2O_3) é indicada para o uso em bombas capilares porque possui condutividade térmica e resistência à corrosão adequadas (RASSAMAKIN, PIMENNY, *et al.*, 2002).

Testes realizados por (RASSAMAKIN, PIMENNY, *et al.*, 2002) mostram a possibilidade do uso de bombas capilares de óxido de alumínio em CPL's e LHP's. Os elementos porosos utilizados possuem porosidade de 60-70%, diâmetro de poro de 0,2 a 10 micrometros, permeabilidade de 4 a $8 \times 10^{-14} \text{m}^2$ e resistência mecânica à compressão de 15 a 22MPa.

Os resultados obtidos indicam que bombas capilares de menor custo e peso podem, entretanto, apresentar problemas de permeação de vapor devido à grande diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do elemento poroso e do corpo do vapor.

Rassamakin et al. (2002) verificaram problemas relacionados com a montagem das bombas capilares com elementos porosos cerâmicos, devido à possibilidade de geração de trincas durante a montagem da bomba capilar e, no caso de aplicação espacial, durante a vibração decorrente do lançamento.

A introdução de poros nos materiais cerâmicos causa, entretanto, a redução da resistência mecânica e dos módulos elásticos. Além disso, a maioria dos

processos de fabricação de cerâmicas porosas proporciona corpos com grande quantidade de trincas e macro defeitos, provocando uma deterioração adicional de suas propriedades mecânicas (BERTI, 2006).

Com intuito de fabricar estruturas porosas cerâmicas com resistência mecânica e módulos elásticos que atendam aos requisitos de projeto, objetivando também reduzir a quantidade de trincas e macro defeitos durante a fabricação, sugere-se então, no presente trabalho, a realização da sinterização reativa para fabricação dos elementos porosos.

2.3 TÉCNICAS DE SINTERIZAÇÃO REATIVA

Materiais cerâmicos, em sua grande maioria, são conhecidos pela fragilidade que apresentam, fato este evidenciado pelos valores de resistência a fratura que não excedem $10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Entretanto, a aplicação de técnicas de processamento específicas que limitam os tamanhos típicos de defeitos e reduzem as heterogeneidades a uma escala micrométrica permite alcançar valores na ordem de GPa para resistência à flexão (BERTI, 2012).

Segundo (KNECHTEL, CLAUSSEN e CAHN, 1995), a confiabilidade das cerâmicas estruturais pode ser controlada por pelo menos quatro mecanismos com diferentes graus de eficiência, por exemplo, distribuição do tamanho do defeito, efeitos da curva-R, esforço que induz plasticidade e redução do tamanho da falha.

Esses parâmetros de controle estão relacionados à sinterização reativa que pode gerar contornos de grão muito claros compostos de grãos bem finos e dispersos (JANSSEN, CLAUSSEN, *et al.*, 2002).

O traço característico das técnicas de sinterização reativa está relacionado com a reação que ocorre durante o período de tratamento térmico. Pode-se tomar como exemplos dessa técnica a sinterização reativa do óxido de alumínio (RBAO) e a sinterização reativa da mulita (RBM) (BERTI, 2012).

As propriedades de processamento das cerâmicas sinterizadas reativamente são descritas na literatura por (CLAUSSEN & WU, 1992). Nesses estudos os compactos de RBAO e RBM demonstraram baixa retração após sinterização e propriedades mecânicas distintas das propriedades provenientes de sua estrutura e morfologia.

Por exemplo, enquanto produtos sinterizados normalmente apresentaram uma retração de 15 a 20%, produtos fabricados via técnica SR – sinterização reativa, exibiram uma retração próximo de zero, o que os torna adequados para aplicações nas quais a forma do produto deve se manter constante.

A característica de retração próximo de zero está associada com a expansão da oxidação das matérias primas, em que as partículas metálicas de até 60 vol.% são combinadas com outras matérias primas (BERTI, 2012).

A mesma abordagem é aplicada a ligas metálicas compostas de materiais intermetálicos provenientes da moagem por atrito. O pó resultante da moagem é seco e prensado, o que leva as partículas de Alumínio e Al_2O_3 formarem contatos por *bridging*, por esta razão, os compactos desses compostos apresentam elevada resistência a verde, e.g. 20 a 50 MPa se comparados as resistências encontradas em compactos dos mesmos materiais só que fabricados convencionalmente (BERTI, 2012).

Durante o aquecimento realizado no tratamento térmico dos compactos ocorrem simultaneamente o mecanismo de sinterização, geralmente associado à retração do compacto, e o mecanismo da oxidação do estado sólido, associado à expansão, logo a ocorrência de ambos os mecanismos balanceia e impede a retração do compacto. Em técnicas de SR onde a *net shape* não é uma prioridade, a retração pode alcançar no máximo, 5% (CLAUSSEN e WU, 1992).

Estruturas provenientes de sinterização reativa usualmente exibem 3 a 8% de micro poros homogeneamente distribuídos na estrutura com tamanhos menores que 1 micrometro. Estes compactos podem apresentar resistência mecânica de 500 MPa, 94,5% da densidade teórica e podem apresentar até 20 vol.% ZrO_2 como reforço de fase (CLAUSSEN e WU, 1992).

Técnicas de SR podem ser modificadas de diversas formas utilizando outro metal, e.g. Zr, Cr, Si etc, ou aditivos cerâmicos, e.g. ZrO_2 , Cr_2O_3 , MgO, SiC etc. Dependendo da modificação selecionada, o compacto da SR pode apresentar: uma baixa retração como observado nas técnicas de RBAO; nenhuma ou mínima retração, e.g. sinterização reativa entre alumínio/óxido de cromo; ou até uma mínima expansão, e.g. RBM (CLAUSSEN e WU, 1992) (CLAUSSEN, LE e WU, 1989).

2.3.1 Técnica RBAO

Autores na literatura (CLAUSSEN *et al.*, 1990) trabalharam com a fabricação de alumina via sinterização reativa com retrações (<1%). Neste caso, os pós das amostras moídas de Al/Al₂O₃ foram tratados termicamente a temperaturas entre 1200 e 1550°C, de modo que a expansão devida à reação entre Al e Al₂O₃ e a retração de sinterização do Al₂O₃ foram praticamente equilibradas. A título de comparação, esses autores encontraram uma retração~ 14% para amostras compostas de 100% Al₂O₃.

Segundo (CLAUSSEN e WU, 1992), o mecanismo de controle de retração ou até possível expansão ocorre durante o tratamento térmico das amostras; durante o ciclo de aquecimento em temperaturas ainda abaixo de 450°C, ocorre o revestimento das partículas de alumínio por uma fina camada passiva amorfa, a partir de 450°C o alumínio oxida diretamente para a estrutura cristalina de γ -Al₂O₃, assim como a fina camada que o envolvia. Durante a oxidação o oxigênio se difunde ao longo dos contornos de grão na superfície do óxido formado. Essa difusão se dá pela natureza incoerente dos dois componentes e pela formação de grãos ultrafinos de Al₂O₃ que acabam oferecendo um caminho efetivo de transporte. Devido à expansão de 39% associada a oxidação da γ -Al₂O₃ formam-se microtrincas na superfície do óxido, o que faz aumentar presença de oxigênio. Assim, a expansão volumétrica associada a oxidação, e diferença de expansão térmica associada a expansão da Al₂O₃ e do Alumínio fazem com que a curvatura relacionada ao gradiente de pressão através da casca do óxido aumente as tensões ao longo da camada do mesmo levando a microfissuras. Sabe-se que essa camada é fortemente dependente do tamanho da partícula e do aumento da diminuição do tamanho das partículas de Alumínio.

Em seguida, no sistema da reação, ocorre a oxidação do Al ou por difusão de oxigênio ao longo das fronteiras de grão e microfissuras em grandes partículas ou, em partículas menores, por difusão do gás através fissuras na camada de óxido. Uma vez que o último processo é mais rápido do que o primeiro, a oxidação de pequenas partículas de Al domina no regime de temperatura entre 450 e 520 °C.

Em temperaturas acima de 520 °C ocorre um aumento na espessura da parede do óxido, logo, isso aumenta o caminho do oxigênio para permear a estrutura, diminuindo assim a velocidade da oxidação, ou seja: a oxidação fica

limitada. Isso ocorre entre 520 e 660 °C. Acima da temperatura de fusão, 660 °C, a oxidação de Al é novamente acelerada. Para esclarecer o entendimento, vide Figura 5.

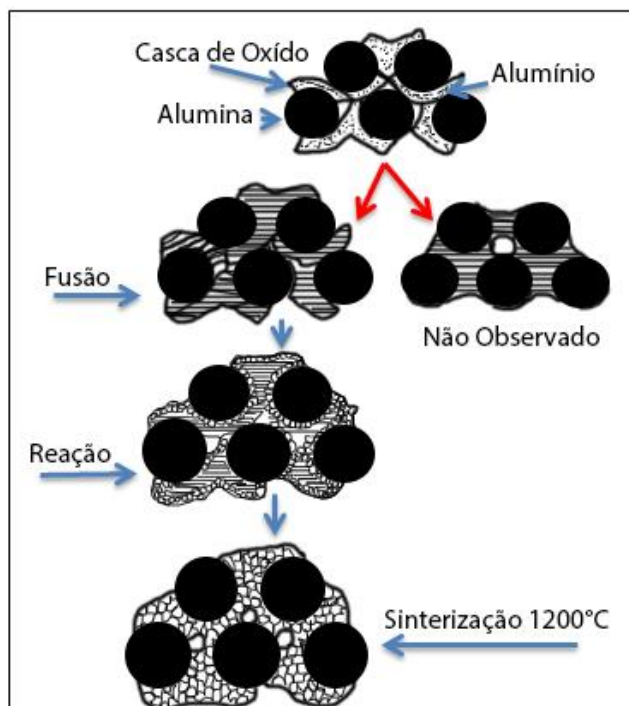


Figura 5 – Mecanismo RBAO

Fonte: Autoria Própria adaptada de (CLAUSSEN e WU, 1992)

Mais tarde, (WU & CLAUSSEN, 1992) propuseram uma redução de cerâmica mulita-zircônia pela combinação da reação RBAO com a reação de (ZrSiO₄) com a adição de pós de alumina Al₂O₃ e alumínio à mistura. Os compactos produzidos apresentaram menor retração, entretanto, apresentaram maior porosidade e menor resistência mecânica. As propriedades finais foram de 350 MPa, 4,5 10MPa√m tenacidade e 13,5% de porosidade. Por outro lado, as amostras modificadas apresentaram 250 MPa, 2,5 10MPa√m e 5,5%, de resistência, dureza e a porosidade, respectivamente (WU e CLAUSSEN, 1990).

Adaptações da sinterização reativa da Al₂O₃ cerâmica foram relatadas na literatura (CLAUSSEN, et al. 1990). Os autores discutiram os possíveis mecanismos do desenvolvimento microestrutural e formação de composto. Neste trabalho os compactos provenientes da moagem e prensagem dos pós de Al/Al₂O₃ com 50% e 35vol.% de Al foram tratados termicamente e produziram uma densidade teórica de 93%. A microestrutura exibiu uma distribuição homogênea fina de poros fechados com tamanhos menores de 1 micrometro (BERTI, 2012).

Pequenas adições de zircônia, até 5vol.%, cooperam para redução considerável dos tempos de sinterização reativa. De acordo com Claussen, *et al.* (1990), Wu *et al.* (1993) e Janssen *et al.* (2002), o processo RBAO começa a partir das misturas precursoras de Al e Al₂O₃. Em praticamente todos os casos, ZrO₂ é adicionada para aumentar a oxidação e para melhorar a microestrutura e propriedades mecânicas do produto final.

As misturas precursoras são intensamente moídas a fim de reduzir o tamanho das partículas, principalmente as de Al para alcançar um elevado grau de homogeneização. Corpos verdes de RBAO com cerca de 30 a 45 vol.% de alumínio permitem que adições de ligantes não sejam necessárias. A técnica RBAO aplicada com compactação isostática com pressões tão baixas quanto 170 MPa é suficiente para se obter corpos verdes com alta resistência à verde (20 MPa em 4 pontos de dobra) que podem ser amplamente usinados para formas complexas e com valores de espessura de parede abaixo de 50 µm (JANSSEN, *et al.*, 2002).

Após a usinagem, os corpos verdes são submetidos a um tratamento térmico de duas etapas na presença de ar, a fim de, primeiramente, oxidar o Al e em seguida, sinterizar o material. A oxidação de Al está associada com uma expansão de volume de 28% juntamente com as elevadas densidades a verde (tipicamente > 60% DT, até 75% possível) isto leva a uma redução da retração proveniente da sinterização em cerca de 10-15%.

Compósitos RBAO testados sem qualquer usinagem, apresentaram valores de resistência típica de 700 MPa após sinterização sem pressão e >1 GPa após prensagem isostática a quente (JANSSEN, *et al.*, 2002) apud (BERTI, 2012).

Deste modo, a estrutura cerâmica porosa será fabricada via sinterização reativa (RBAO) com base nas referências teóricas discutidas acima com intuito de se obter as propriedades descritas nos objetivos específicos.

2.4 INTERFERÊNCIAS

Como apresentado anteriormente, sabe-se que o vapor dentro da bomba capilar é formado na interface entre a estrutura porosa e a parede do tubo do evaporador. Logo deve-se decidir a interferência mais adequada entre ambos para alcançar o melhor desempenho. Segundo (SANTOS, 2010), a correta montagem da estrutura porosa dentro do envelope do evaporador requer atenção, pois, o envelope

metálico requer tolerâncias de interferência suficientemente precisas para que se minimize a resistência térmica e evite qualquer vazamento de vapor para a câmara de compensação.

Assim, pode-se definir interferência, Figura 6, como a diferença negativa entre as dimensões do furo e do eixo, antes da montagem, quando o diâmetro do eixo é maior que o diâmetro do furo (ABNT, 1995).

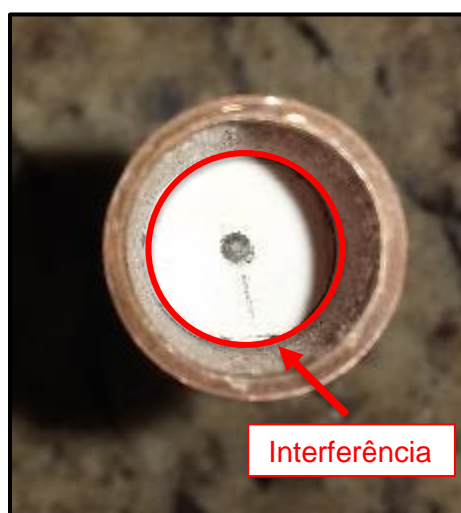


Figura 6 – Interferência
Fonte: Autoria Própria

Devido à elevada quantidade de sistemas de tolerâncias e ajustes, fez-se necessário criar normativas para regulamentar tais sistemas. A norma atual é a NBR 6158/1995, da ABNT, a qual fixa o conjunto de princípios, regras e tabelas que se aplicam a tecnologia mecânica, a fim de permitir a escolha racional de tolerâncias e ajustes, como h5, h6, h7 e h8, visando a fabricação de peças intercambiáveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1 Elemento Poroso Cerâmico

Para a sinterização reativa do elemento poroso foram utilizados pós de Alumina, (alumina calcinada, Imerys, #325mesh) e Alumínio (alumínio, Alcoa 1403). O pó de alumina possui diâmetro de partícula de 90% passante em 10 μ m, 50%

passante em 4 μ m e 10% passante em 1 μ m. O pó de alumínio possui diâmetro de partícula de 50% passante de 2,8 μ m a 3,3 μ m. Neste contexto, o alumínio tem a função de reduzir a retração da estrutura porosa e a alumina elevar a resistência mecânica. As composições típicas das matérias primas podem ser observadas nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição pó de Alumina (% em peso)

Pó de Alumina	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O – Total
Composição Química	Min: 99,1	Max: 0,06	Max: 0,06	Max: 0,015

Fonte: <http://www.treibacher.com.br/treibacher-schleifmittel-brasil-portugues-produtos-polimentos-alumina-calcinada-tap10.php>

Tabela 2 – Composição pó de Alumínio (% em peso)

Pó de Alumínio	Al	Si	Fe	Outros
Composição Química	Min: 99,5	Max: 0,15	Min: 0,25	Max: 0,015

Fonte:

https://www.alcoa.com/brasil/pt/resources/pdf/download/po_de_aluminio/tabela_especificacoes_tecnicas_po.pdf

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1 Misturas das Matérias Primas para Estrutura Porosa

Foram preparadas quatro misturas de pós com diferentes proporções de alumina e alumínio, a primeira mistura foi composta de 60% em peso de alumina e 40% em peso de alumínio. As composições seguintes tiveram um aumento de 10% em peso até a composição 90% em peso de alumina e 10% de alumínio. Para a preparação das misturas as matérias primas foram homogeneizadas manualmente durante 15 minutos e a mistura final foi classificada em uma peneira de 200 mesh, para evitar a formação de agregados. Em seguida, foram separadas cinco amostras de cada composição.

3.2.2 Prensagem das misturas finais

As cinco amostras de cada composição foram compactadas uniaxialmente em uma matriz com formato retangular, por duplo efeito, utilizando pré-carga de

compactação de aproximadamente 12,28 MPa (1,75 toneladas) por 5 segundos e carga de compactação de aproximadamente 24,516 MPa ou (3,5 toneladas) por 20 segundos na prensa hidráulica Skay com capacidade de 30 toneladas. Para obter compactos com maiores dimensões, foi utilizado o recurso mostrado na Figura 7; esse recurso (madeiras) permitiu o aumento do volume do molde e conseqüentemente mais material foi colocado dentro do mesmo. A título de comparação, foram aferidas as dimensões dos compactos a verde para posterior comparação com os compactos tratados termicamente.



Figura 7 – Aparato utilizado para obter maiores amostras e Molde
Fonte: Autoria Própria

3.2.2 Tratamento Térmico

Com o intuito de conferir às amostras, as propriedades desejadas e avaliar o comportamento dessas submetidas à técnica do RBAO adaptado para as necessidades dessa aplicação, as amostras recém-compactadas foram tratadas termicamente como demonstradas na Figura 8.

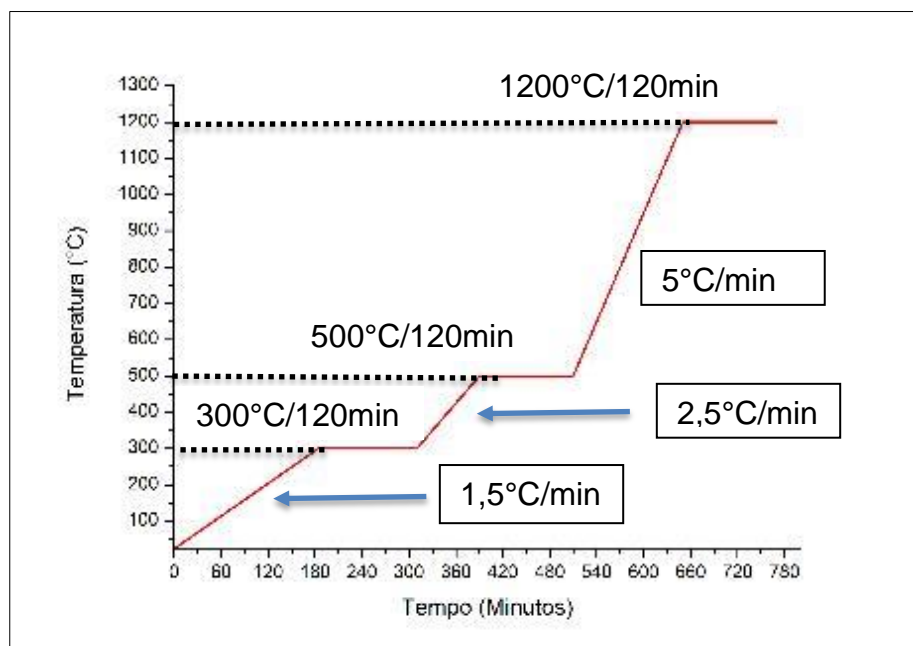


Figura 8 – Tratamento térmico das amostras
Fonte: Dados da Pesquisa

No tratamento térmico existem quatro patamares presentes, são eles: o primeiro a 80°C, não representado na Figura 8, pois só foi utilizado para remoção de umidade das amostras; o segundo a 300°C, o terceiro a 500°C e o último a 1200°C. O tempo de permanência nesses patamares é de 120 minutos. A taxa de aquecimento para alcançar o primeiro e o segundo patamares é de 1,5°C/minuto, para o terceiro 2,5°C/minuto e para o último 5°C/minuto. O resfriamento das amostras se deu de forma gradual dentro do forno. Após o tratamento foram aferidas as dimensões das amostras para posterior análise.

3.2.3 Usinagem das Estruturas Porosas

O formato final (cilíndrico), tolerâncias, interferências, ranhuras finais e ângulos de entrada foram usinados, com a broca PM6 da JET Carbide Burs, acoplada na microretífica Dremel 4000, fixada no torno convencional IMOR 364. Para auxiliar o processo de usinagem, as amostras foram lixadas em uma lixa 80. Esse processo permitiu deixar as amostras no formato demonstrado na Figura 9, forma essa que facilitou o momento de centrar a amostra no torno.

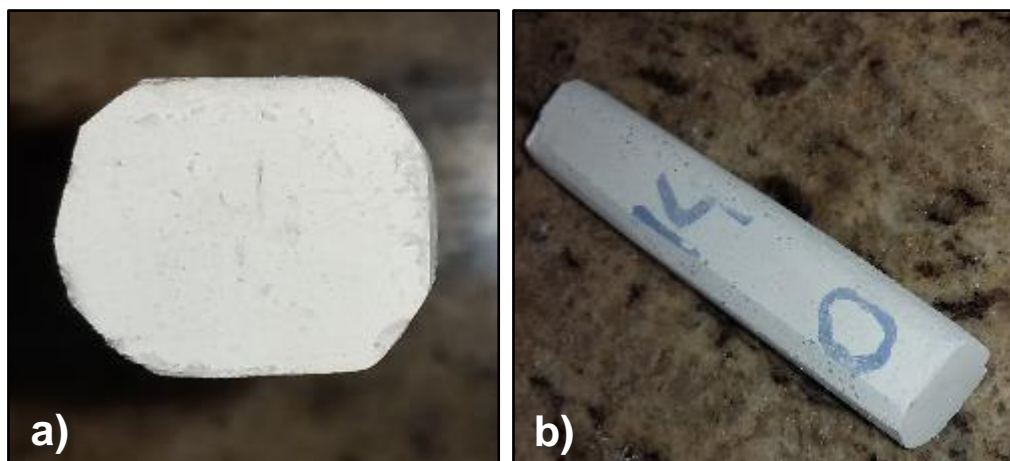


Figura 9 – Amostra Pós-Lixamento: a) Vista frontal; b) Vista superior.
Fonte: Autoria Própria

A usinagem das amostras foi realizada em três fases. A primeira delas, utilizada para produzir o formato cilíndrico as barras, a segunda para atribuir as tolerâncias e ranhuras finais e a terceira para conferir o ângulo de entrada às estruturas porosas para auxiliar o encaixe no envelope do evaporador (Figura 13). O aparato utilizado para realização de ambas as fases da usinagem está demonstrado na Figura 10.



Figura 10 – Aparato para usinagem
Fonte: Autoria Própria

As primeiras duas fases da usinagem conferiram o formato cilindro e as relações de interferência das amostras, para isso foram utilizados os mecanismos do torno demonstrados nas Figuras 11 e 12.

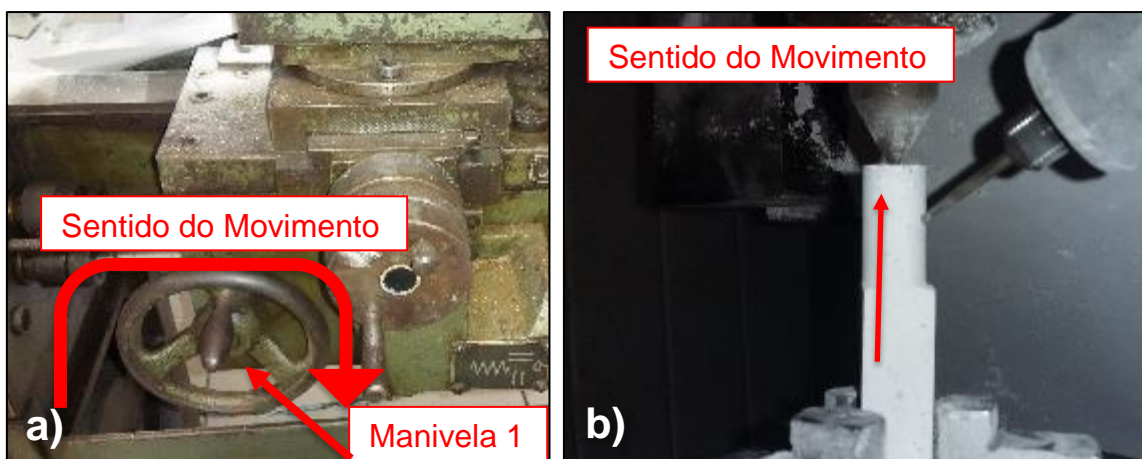


Figura 11 – Mecanismos para primeira e segunda fases da usinagem das amostras. a) Posição da Manivela 1; b) Sentido da fresa.
Fonte: Autorial Própria

A Manivela 1 regulou a distância longitudinal da usinagem. Para evitar erros nessa fase da operação, o controle dessa manivela foi exercido automaticamente pelo torno, sendo apenas determinado pelo operador o ponto inicial da usinagem. Já a Manivela 2, mais utilizada na segunda fase da usinagem, determinou a distância, em milímetros, da qual seria removido o material da amostra. A regulação da Manivela 2 foi totalmente determinada pelo operador para que se pudessem usinar todas as relações de interferência desejadas para o trabalho.



Figura 12 – Primeira e Segunda fases das usinagens. a) Posição da Manivela 2; b) Sentido da fresa.
Fonte: Autorial Própria

Por fim na terceira fase, ou seja, a usinagem dos ângulos de entrada, foi realizado o seguinte procedimento: Primeiro ajustou-se a direção da retífica em 5

graus para conferir o ângulo de corte, em seguida ajustou-se a posição da retífica no torno, com os usos das manivelas 1 e 2, nas Figuras 11 e 12. Em seguida, nivelou-se o centro da fresa com o centro da amostra a ser usinada, depois a fresa foi novamente reposicionada a 2mm do começo da amostra, atentando-se ao fato de que se deve manter o nivelamento realizado anteriormente. Após esses ajustes, ligou-se a retífica e com a manivela 3, Figura 13, que controla o movimento da fresa, foi rotacionada para realizar a primeira passagem para usinar o ângulo de entrada. Após essa primeira passagem, avança-se uma divisão no sentido longitudinal da amostra e repete-se o processo da rotação. Ao final desse procedimento foi obtido o ângulo de entrada das amostras com diferentes interferências.

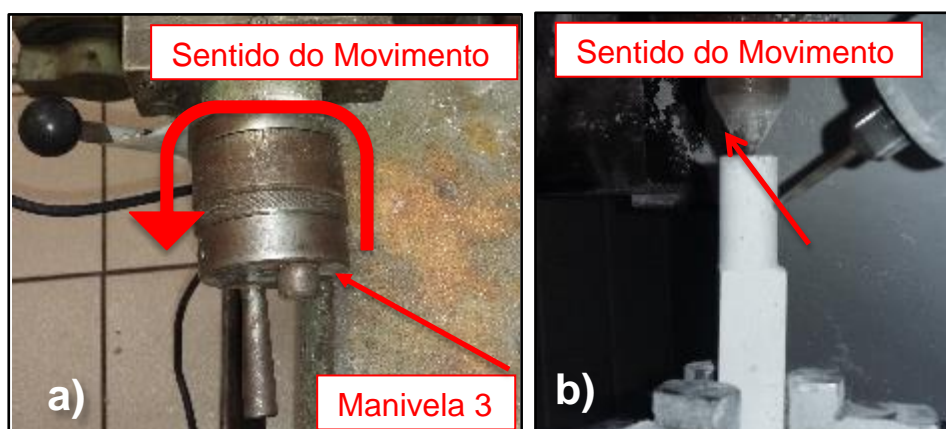


Figura 13 – Terceira fase da usinagem das amostras
Fonte: Autoria Própria

3.3. CARACTERIZAÇÃO

A caracterização compreendeu do módulo de ruptura a partir do ensaio de flexão de 3 pontos nos compactos pós-tratamento, sem usinagem, a fim de verificar a influência da quantidade de alumínio nas propriedades mecânicas. Outra caracterização realizada nesses compactos foi análise da fratura causada pelo ensaio de flexão. Já nas estruturas finais usinadas, foram realizados testes de bolhamento, porosidade e densidade.

3.3.1 Teste do Bolhamento

O procedimento para esse teste se dá de forma que o elemento poroso foi inserido pela entrada superior do evaporador. Para garantir a entrada da estrutura porosa no evaporador aqueceu-se a entrada do tubo para que ocorresse a dilatação térmica e facilitando assim a entrada da estrutura. Foi colocado um anteparo na base do evaporador para que com ele se se posiciona a estrutura porosa Figura 14.

Em seguida, retirou-se o emissor de calor para que o tubo retraísse e fixasse a estrutura no interior do tubo. Por fim fechou-se o sistema e imprimiu a pressão em kilopascal com o compressor AirZap modelo Da1000 (Figura 15). A pressão considerada como limite foi 300kPa, por motivos de segurança e por que tal valor supera em muito o valor requerido para o funcionamento do sistema trocador de calor.

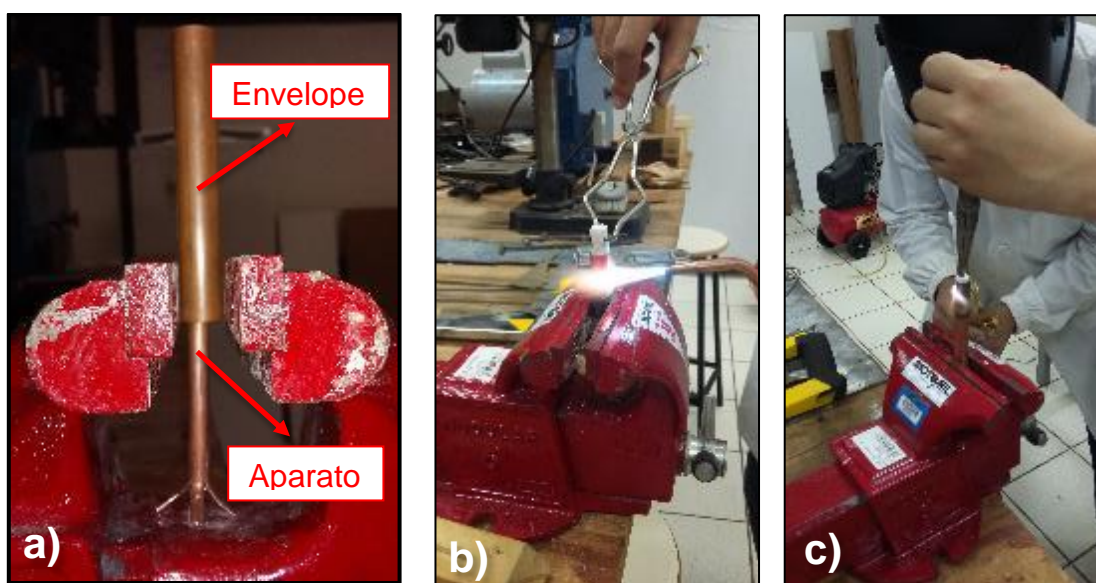


Figura 14 – Método para fixar a estrutura porosa dentro do tubo do evaporador. a) Vista frontal; b) Vista superior da fixação; c) Fixação da estrutura porosa via dilatação térmica
Fonte: Autoria Própria

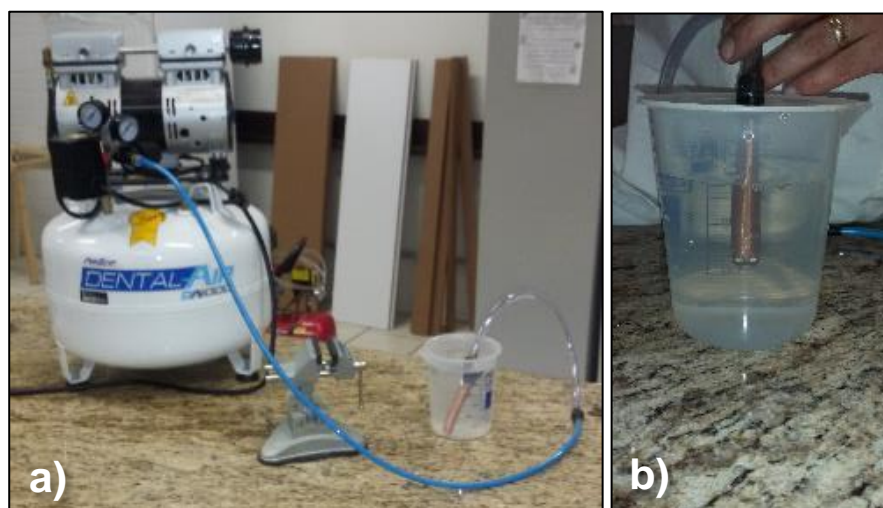


Figura 15 – a) Montagem teste de bolhamento; b) Momento da bolha
Fonte: Aatoria Própria

Aguardou-se a formação do menisco (formação da bolha) na interferência entre a estrutura porosa e o tubo de cobre do evaporador, quando esse menisco deixou de existir – colapsar (ocorrer a bolha) – identificou-se a pressão capilar máxima da amostra estudada. O raio crítico é calculado de acordo com a Equação de Young-Laplace, de acordo com a Equação abaixo. Para os cálculos adotou-se para o σ o valor teórico de tensão interfacial da água, fluido de trabalho, de $7,2 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ e o ângulo de molhamento foi considerado zero, ou seja, molhamento total do sólido pelo líquido.

$$r = \frac{2\sigma(\cos\theta)}{P_c} \quad (1)$$

Onde:

P_c = Pressão Capilar (kPa)

σ = tensão interfacial (N/m)

θ = ângulo de molhamento entre água e o sólido (°)

r = raio do capilar (mm)

3.3.2 Porosidade e Densidades Geométrica e Arquimedes

A determinação da porosidade foi determinada através das Equações 2 a 7. Já as densidades foram determinadas pelo Princípio de Arquimedes (Equação 2), e pelo princípio geométrico (Equação 3). Para esse teste foi utilizada uma balança Shimadzu modelo UX620H, com uma resolução de 0,001 g. O princípio de

Arquimedes empregado nesta análise utiliza o aparato da Figura 16 para a coleta dos dados necessários para as equações. Para a determinação da densidade via Arquimedes deixou-se as amostras em água a 100°C durante duas horas e após esse tempo foram coletadas as medidas necessárias para o cálculo. Para esse procedimento utilizou-se um aquecedor Dragonlab modelo MS7-H550-Pro.

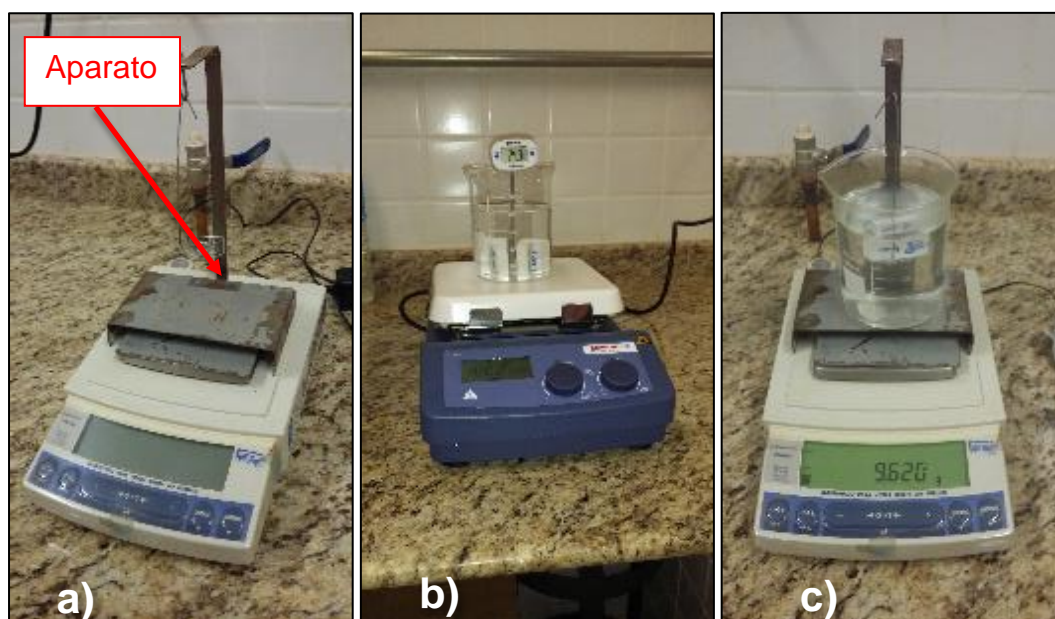


Figura 16 – Aparato para Densidade Arquimedes: a) Aparato; b) Aquecimento das Amostras; c) Amostra Imersão
Fonte: Autorial Própria

As medidas aferidas para o cálculo da densidade foram: m_1 representa a massa do material, m_2 a massa do material imerso na água destilada e m_3 representa a massa do material impregnada de água, contida dentro dos poros do material e V o volume desse material. Para o cálculo da porosidade foram utilizadas as equações 4, 5, 6 e 7 abaixo, adotando-se as densidades teóricas dos materiais utilizados.

$$\rho = \frac{m_1 * \rho_{h_2o}}{m_3 - m_2} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{m_1}{V} \quad (3)$$

$$\rho_{Téorica} = \rho_{Alumina} \quad (4)$$

$$1 = f_s + f_v \quad (5)$$

$$f_s = \frac{\rho_{aparente}}{\rho_{teórica}} \quad (6)$$

$$\%porosidade = \left(1 - \frac{\rho_{aparente}}{\rho_{teórica}}\right) \times 100 \quad (7)$$

Onde:

f_v = Fração espacial de vazios (%)

f_s = Fração espacial de sólidos (%)

3.3.3 Tensão de Ruptura a Flexão

Para determinação da tensão de fratura, foi utilizado o ensaio de flexão em 3 pontos com base na terminologia ASTM 1145-02 e norma ASTM C 1161-02c. A fórmula para determinar a tensão de ruptura é dada pela Equação 8. Para o ensaio foram preparados 3 corpos de prova na forma de barras (70mm x 20mm x 110mm) para cada composição avaliada, sendo elas (60% alumina e 40% alumínio) (70% alumina e 30% alumínio), (80% alumina e 20% alumínio) e (90% alumina e 10% alumínio). Os corpos de prova foram submetidos a uma carga de 50kg e velocidade de ensaio 0,5mm/min. A carga foi aplicada no centro da face superior do corpo de prova, este centro é determinado com base nas distâncias entre os apoios, no caso, 50mm. Vide Figura 17. Para a elaboração dos resultados foi utilizado o software Origin® 8,5.

$$\sigma_R = \frac{3}{2} * \left(\frac{P_{Máx} * L}{b * h^2}\right) \quad (8)$$

Onde:

$P_{máx}$ = força de ruptura (N)

b = largura do corpo de prova (mm)

h = altura do corpo de prova (mm)

L = distância entre os dois apoios (mm).

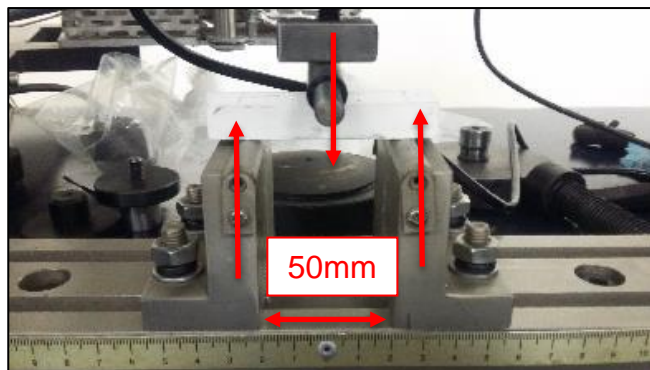


Figura 17 – Aparato para o ensaio de flexão de 3 pontos
Fonte: Autoria Própria

3.3.3 Análise da superfície de fratura

Para a análise da superfície de fratura, seguiu-se o procedimento empregado para análise de tais superfícies, ou seja, primeiramente foram levantados os dados sobre as barras de alumina fraturadas seguido de um exame visual utilizando um estereoscópio Physis Modelo Exp 90, Figura 18.

A utilização desse equipamento consistiu em colocar as amostras no centro da porta amostra, seguido do ajuste do foco e claridade para melhor visualizar as amostras. Com auxílio de uma câmera, registrou-se as imagens para posterior análise. Ainda sobre a análise, diferentemente da metodologia utilizada para estudar a fratura em materiais metálicos, em materiais cerâmicos as partes foram reconstruídas para que fosse possível localizar o local de origem da fratura, atentando-se ao fato de buscar a posição de onde uma única trinca se ramifica ou várias trincas se encontram, pois essas regiões serão os locais de início da trinca.

Foi essencial encontrar a origem da fratura e sua propagação, para, assim, correlacionar essas características com as tensões impostas de serviço.



Figura 18 – Aparato para análise da Fratura
Fonte: Autoria Própria

3.3.4 Expansão volumétrica

Com base no trabalho de (CLAUSSEN, TRAVITZKY e WU, 1990), utilizou-se a Equação 09 para o cálculo da variação volumétrica (S) das amostras fabricadas via técnica da sinterização reativa, onde o primeiro o termo da Equação está relacionado com a expansão proveniente da oxidação do metal e o segundo em consideração a retração proveniente da sinterização da estrutura porosa. Para o alumínio, ocorre uma expansão volumétrica de 28%.

$$S = \left[\left(\frac{1 + \sum v_i V_i}{1 + 0,28 f V_{al}} \right) * \left(\frac{\rho_o}{\rho} \right) \right]^{\frac{1}{3}} - 1 \quad (9)$$

Onde:

v_i = expansão do volume associada a expansão do alumínio

V_i = fração volumétrica de alumínio

f = fração de alumínio oxidada durante a moagem

ρ_0 = densidade a verde

ρ = densidade final

Para posterior análise foram mensurados os volumes finais das amostras experimentalmente e esses valores foram comparados com os resultados obtidos via a Equação 09. Também foi realizado o cálculo de propagação de erro para validar os resultados obtidos. Para a propagação de erro foi utilizada a Equação 10.

$$\sigma_{\bar{S}} = \sqrt{\left(\frac{\partial S}{\partial V_i}\right)^2 * (\sigma_{\bar{V}_i})^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \rho_0}\right)^2 * (\sigma_{\bar{\rho}_0})^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial \rho}\right)^2 * (\sigma_{\bar{\rho}})^2} \quad (10)$$

Onde:

$\sigma_{\bar{V}_i}$ = desvio padrão associado à fração volumétrica

$\sigma_{\bar{\rho}_0}$ = desvio padrão associado à densidade a verde (g/cm³)

$\sigma_{\bar{\rho}}$ = desvio padrão associado à densidade final (g/cm³)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos da metodologia aplicada, sendo o primeiro deles relacionado com a expansão volumétrica das misturas preparadas, densidade geométrica e Arquimedes, porosidade geométrica e Arquimedes, pressão capilar das estruturas porosas em relação aos parâmetros de usinagem, valores de resistência a ruptura em flexão de 3 pontos e por fim análise da superfície da fratura das amostras.

4.1.1 Expansão Volumétrica

A Tabela 3 apresenta a variação da composição das misturas em relação a seus volumes antes e depois do tratamento térmico.

Tabela 3 – Composição das Misturas em relação ao Tratamento Térmico.

Composição Alumina/Alumínio (%)	Al ₂ O ₃ (g)	Al (g)	Volume Pré-TT (cm ³)	Volume Pós-TT prática (cm ³)	Variação Volumétrica prática (%)	Volume Pós-TT teórico (cm ³)	Variação Volumétrica teórica (%)
90/10	22,505	2,508	14,522 ± 0,085	15,532 ± 0,113	6,961 ± 1,114	14,658 ± 0,064	0,093 ± 0,204
80/20	20,005	5,013	14,916 ± 0,084	17,950 ± 0,160	20,342 ± 1,547	15,120 ± 0,020	1,366 ± 0,441
70/30	17,513	7,508	14,647 ± 0,134	18,152 ± 0,153	23,931 ± 0,619	15,018 ± 0,128	2,533 ± 0,152
60/40	15,002	10,006	15,021 ± 0,270	18,288 ± 0,087	21,631 ± 1,595	15,101 ± 0,202	0,540 ± 0,478

Fonte: Dados da Pesquisa

A Figura 19 demonstra a variação de volume das amostras com diferentes composições após o tratamento térmico.

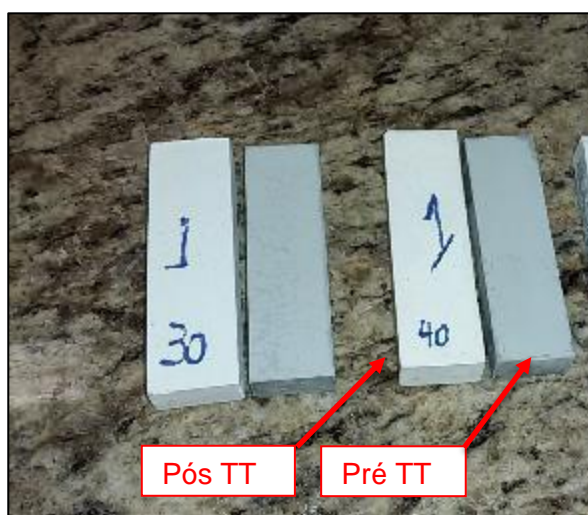


Figura 19 – Diferença Volumétrica das amostras.
Fonte: Autoria Própria

A Figura 20 compara as expansões e os volumes teóricos e experimentais das amostras.

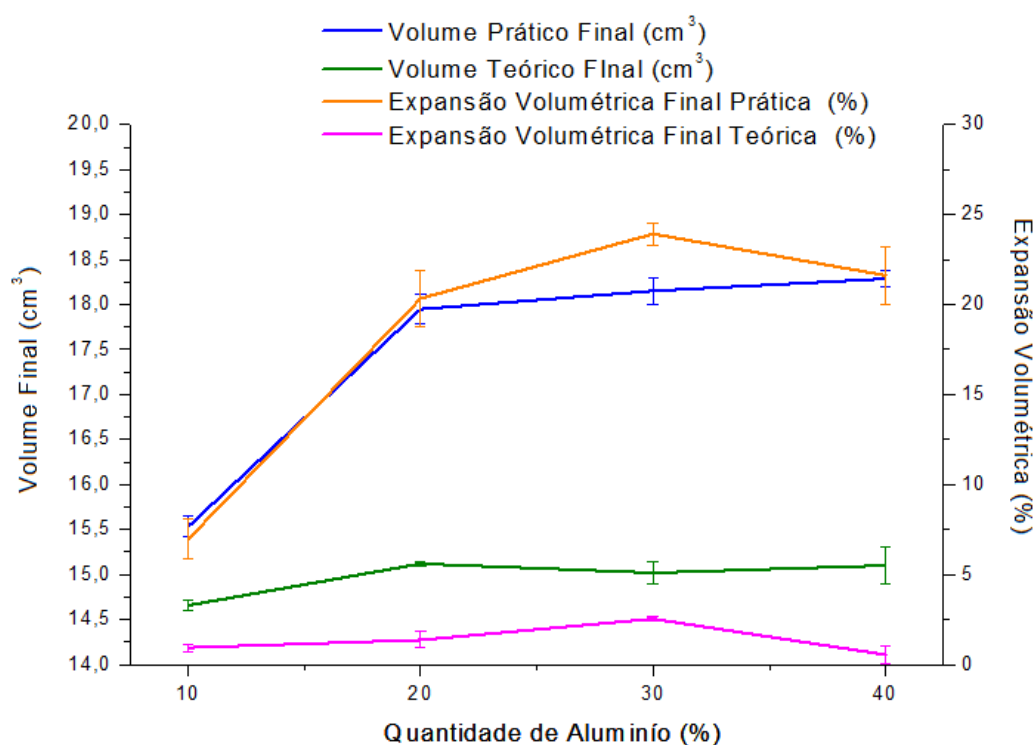


Figura 20 – Gráfico de comparação entre a expansão experimental e a teórica
Fonte: Dados da Pesquisa

Na Tabela 4 são apresentados os dados de propagação de erro para as amostras estudadas.

Tabela 4 – Erros relacionados a expansão do volume das amostras

Composição Alumina/Alumínio (%)	Desvio Padrão Fração Volumétrica (g/cm ³)	Desvio Padrão Densidade a Verde Geométrica (g/cm ³)	Desvio Padrão Densidade Final Geométrica (g/cm ³)	Erro Propagado para Expansão (cm ³)	Volume pós-TT teórico (cm ³)
90/10	± 0,001	± 0,009	± 0,003	0.002	14,658 ± 0,002
80/20	± 0,001	± 0,022	± 0,002	0.004	15,120 ± 0,004
70/30	± 0,002	± 0,027	± 0,021	0.007	15,018 ± 0,007
60/40	± 0,001	± 0,031	± 0,009	0.006	15,101 ± 0,006

Fonte: Dados da Pesquisa

4.1.2 Densidade Aparente

A Tabela 5 apresenta o valor da densidade aparente determinada pelas técnicas da densidade geométrica e Arquimedes encontrado nas amostras com variadas composições. A Figura 21 compara o valor das densidades determinadas por diferentes métodos.

Tabela 5 – Densidade aparente das amostras

Amostra	Al ₂ O ₃ (g)	Al (g)	Densidade Aparente Arquimedes (g/cm ³)	Densidade Aparente Geométrica (g/cm ³)
90/10	22,505	2,508	1,838 ± 0,035	1,694 ± 0,003
80/20	20,004	5,015	1,857 ± 0,021	1,685 ± 0,002
70/30	17,513	7,508	1,889 ± 0,025	1,698 ± 0,021
60/40	15,005	10,008	1,892 ± 0,030	1,790 ± 0,009

Fonte: Dados da Pesquisa

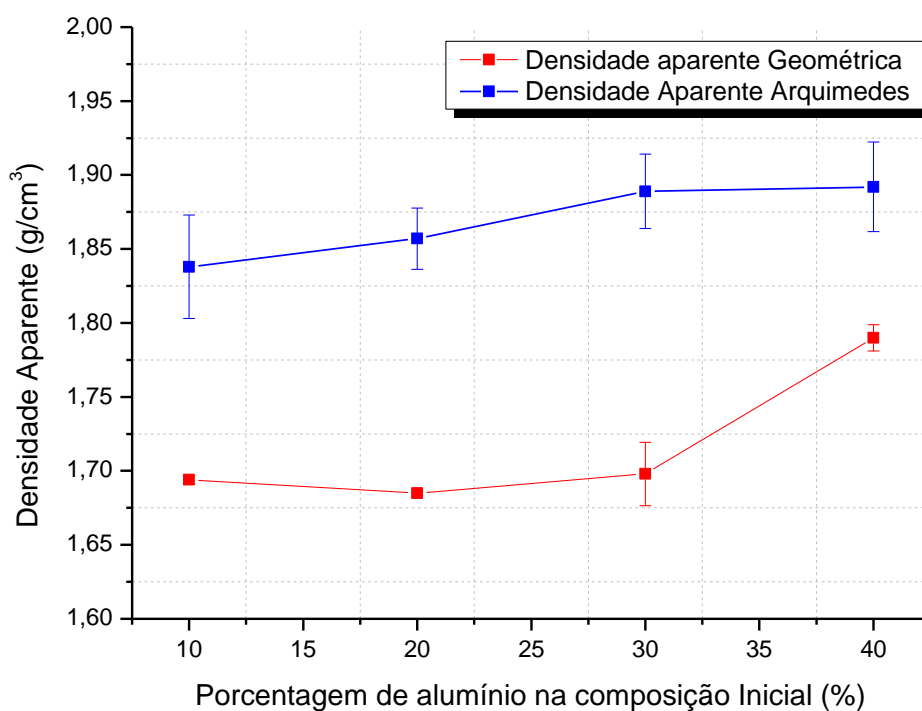


Figura 21 – Gráfico de comparação entre as densidades aparentes calculadas por diferentes princípios

Fonte: Dados Pesquisa

4.1.3 Porosidade

A Tabela 6 e a

Tabela 7 apresentam os valores da porosidade determinada com base nos princípios Geométrico e Arquimedes, das diferentes composições estudadas. Para os cálculos foram utilizadas as equações 2 a 7.

Tabela 6 – Porosidade Geométrica de cada amostra

Amostras	Volume Médio Experimental pós-TT (cm ³)	Massa Média (g)	Densidade Aparente g/(cm ³)	Porosidade Média %
90/10	15,532 ± 0,113	26,310 ± 0,150	1,694 ± 0,003	57,44 ± 0,001
80/20	17,950 ± 0,160	30,244 ± 0,249	1,685 ± 0,002	57,65 ± 0,001
70/30	18,152 ± 0,153	30,825 ± 0,324	1,698 ± 0,021	57,33 ± 0,005
60/40	18,288 ± 0,087	32,753 ± 0,079	1,790 ± 0,009	55,00 ± 0,002

Fonte: Dados da Pesquisa

Tabela 7 – Porosidade Arquimedes de cada amostra

Amostras	Volume Médio Experimental pós-TT (cm ³)	Massa Média (g)	Densidade Aparente g/(cm ³)	Porosidade %
90/10	15,532 ± 0,113	26,310 ± 0,150	1,838 ± 0,035	51,253 ± 0,539
80/20	17,950 ± 0,160	30,244 ± 0,249	1,857 ± 0,021	49,611 ± 0,984
70/30	18,152 ± 0,153	30,825 ± 0,324	1,889 ± 0,025	48,351 ± 1,149
60/40	18,288 ± 0,087	32,753 ± 0,079	1,892 ± 0,030	47,400 ± 0,993

Fonte: Dados da Pesquisa

A Figura 22 mostra um gráfico que compara o valor das porosidades determinadas. Em vermelho pelo princípio Geométrico, em azul pelo princípio de Arquimedes.

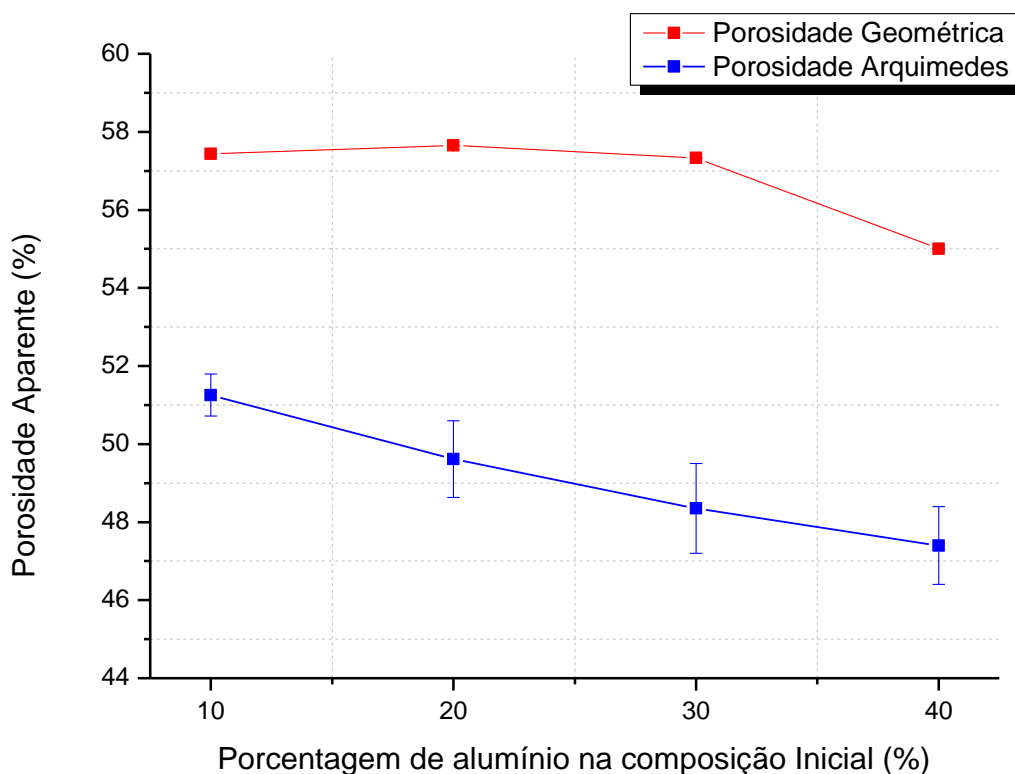


Figura 22 – Gráfico de comparação entre as porosidades aparentes calculadas por diferentes princípios
Fonte: Dados Pesquisa

4.1.4 Tensão de Ruptura em Flexão

A Tabela 8 mostra o valor médio e o desvio padrão da resistência a fratura das amostras em (MPa) em relação a porcentagem de alumínio presente na composição das amostras submetidas ao ensaio de flexão em 3 pontos.

Tabela 8 – Resistência a Flexão em relação ao teor de Alumínio

Amostra	Porosidade Arquimedes (%)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
90/10	51,253 ± 0,539	4,919	±0,507
80/20	49,611 ± 0,984	9,419	±0,773
70/30	48,351 ± 1,149	10,693	±1,037
60/40	47,400 ± 0,993	13,632	±0,988

Fonte: Dados da Pesquisa

Com base nos dados da Tabela 8, foi plotado o gráfico da Figura 23 para facilitar a relação entre tais características.

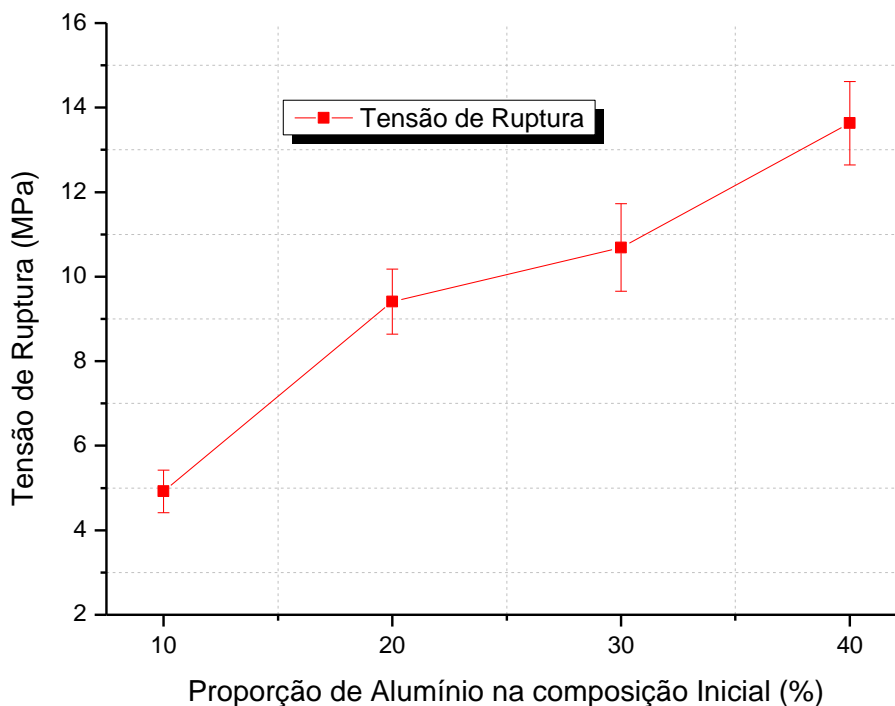


Figura 23 – Gráfico Tensão de Ruptura X Quantidade de Alumínio
Fonte: Dados da Pesquisa

4.1.5 Pressão Capilar

A Tabela 9 apresenta o valor da pressão capilar encontrada nas amostras com 40% de alumínio, utilizados para o teste. A escolha por essa composição se deu uma vez que esta apresenta maior resistência mecânica à flexão em relação às demais, o que facilitou a preparação da amostra para o teste.

Tabela 9 – Valor da Pressão capilar em relação a interferência

Amostra (60%-40%)	Interferência (mm)	Pressão Capilar (kPa)	Montagem
1	A	40	Fácil
2	B	80	Fácil
3	C	-	Difícil
4	D	-	Difícil

Fonte: Dados da Pesquisa

4.1.6 Análise da superfície da fratura

A seguir, nas Figuras 24, 25, 26 e 27, são apresentadas as superfícies da fratura e as amostras que foram submetidas aos ensaios de flexão de 3 pontos. Cada amostra apresenta um conjunto de 4 imagens que mostram macroscopicamente a superfície da fratura e as peças pós-fratura.

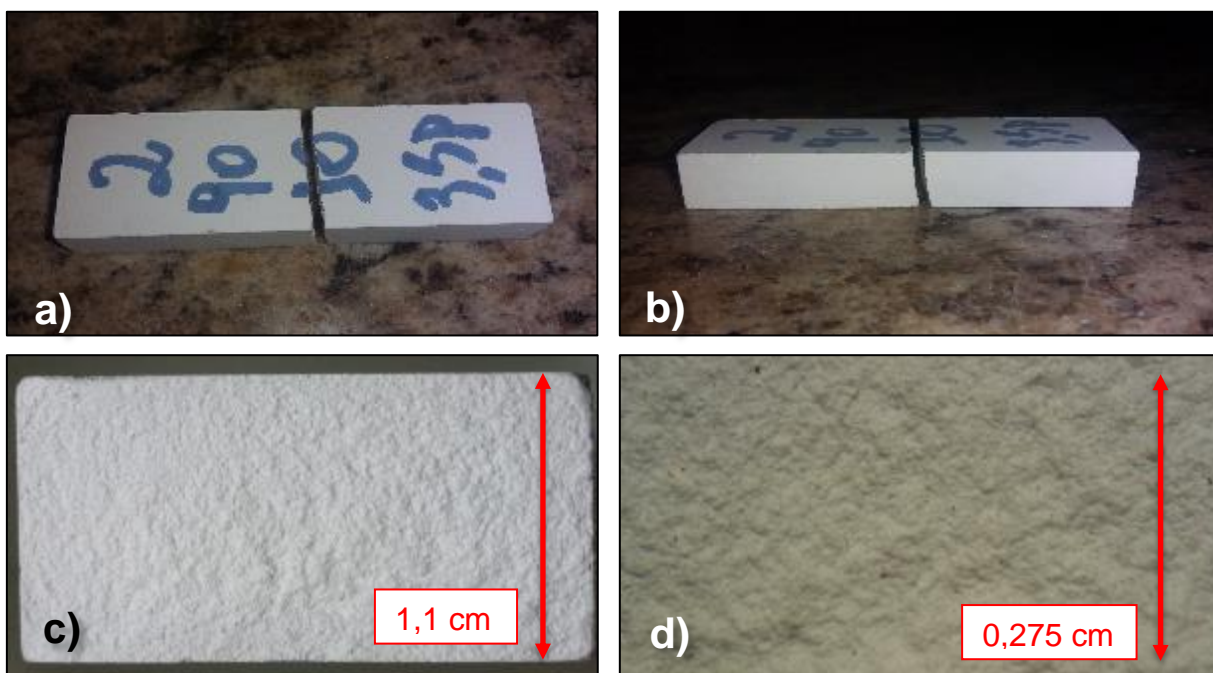


Figura 24 – Superfície da Fratura da amostra 90-10: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x

Fonte: Autoria Própria

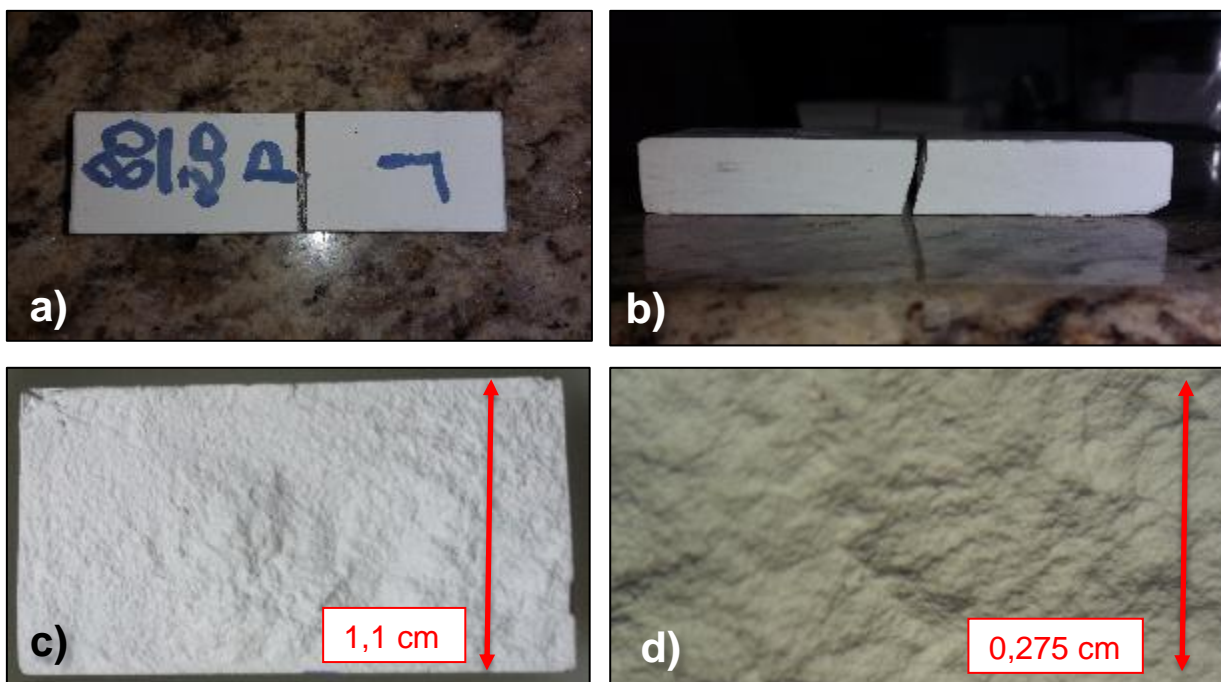


Figura 25 – Superfície da Fratura da amostra 80/20: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x

Fonte: Autoria Própria

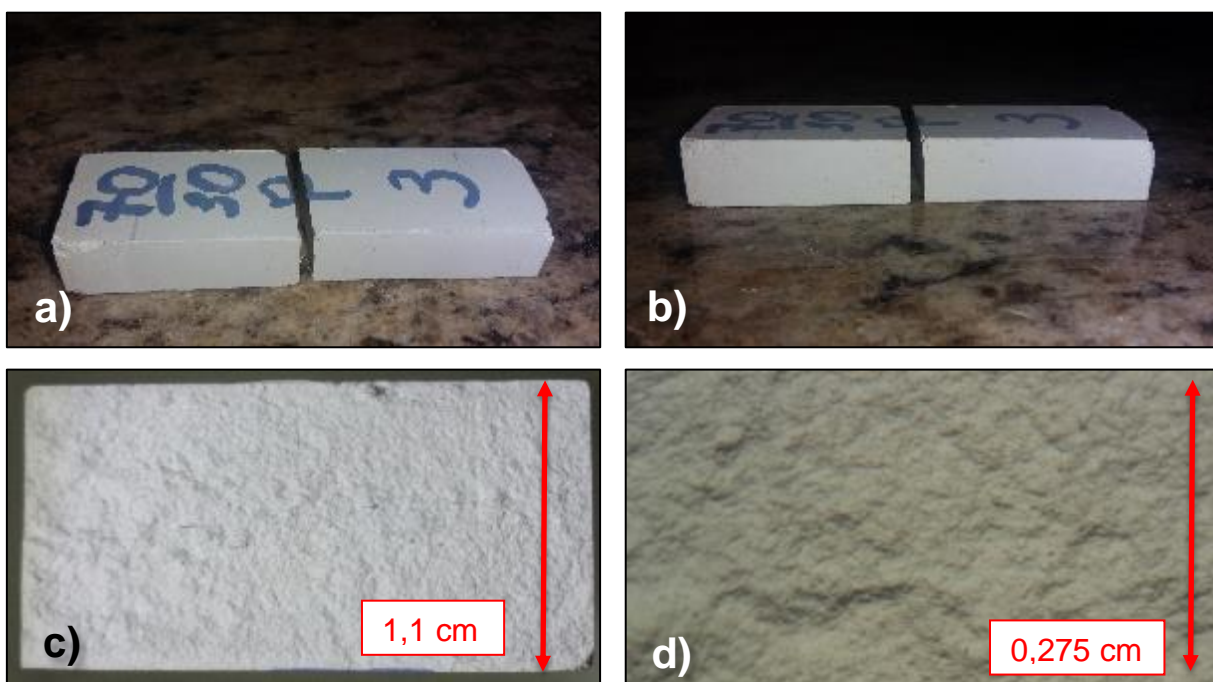


Figura 26 – Superfície da Fratura da amostra 70/30: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x

Fonte: Autoria Própria

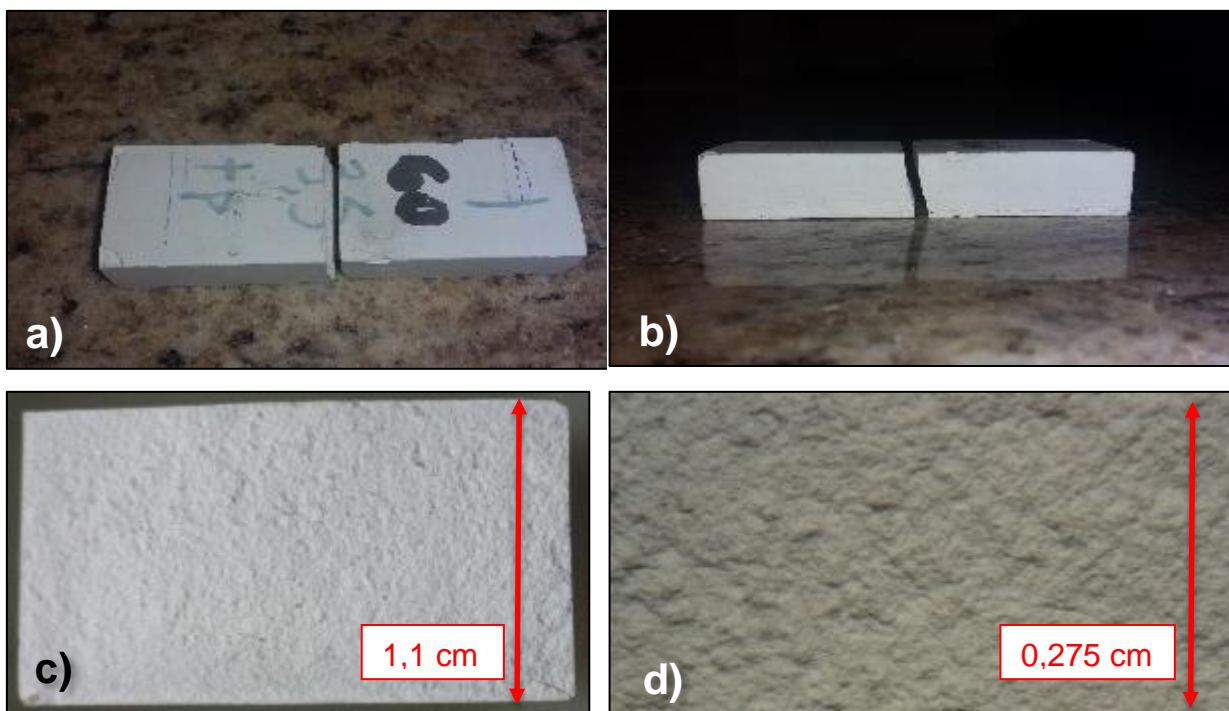


Figura 27 – Superfície da Fratura da amostra 60/40: a) Vista Superior da amostra; b) Vista Lateral da amostra; c) Superfície de fratura com aumento de 10x; d) Superfície de fratura com aumento de 30x

Fonte: Autoria Própria

4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.2.1 Expansão Volumétrica

Com base dos dados obtidos pela Equação 09 pode-se notar que todas as amostras estudadas apresentaram expansões volumétricas. Vale ressaltar que as maiores expansões, na prática, ocorreram nas amostras que apresentavam os maiores teores de alumínio.

Essas amostras tiveram um aumento teórico menor do que o valor observado na prática. Isso ocorreu, pois a Equação 09 que calcula essa expansão também considera a sinterização sofrida pela amostra. Como as amostras não permaneceram durante o tratamento térmico em uma temperatura e tempo suficientes para consolidar a sinterização, não ocorreu a retração relacionada a esse fenômeno, sendo assim o volume visto na prática foi maior do que na teoria. Estruturalmente a presença de alumínio gerou uma maior gradiente de tensão entre a alumina que envolve a superfície das partículas de alumínio e as partículas do metal. Esse fato gerou microtrincas na superfície do óxido o que consequentemente

levou a um aumento na difusão de oxigênio para o interior da amostra. Assim, a oxidação das partículas de alumínio ocorreu de forma mais intensa gerando a expansão observada no compacto.

Nas demais amostras ocorreu o mesmo mecanismo de expansão, mas em menor intensidade em virtude da redução gradativa da quantidade de alumínio.

4.2.2 Densidade aparente Geométrica e Arquimedes

Segundo os dados obtidos pelos cálculos das densidades, pode-se observar que todas as estruturas apresentaram um valor de densidade dentro do intervalo de utilização para sistemas de bombeamento capilar. Tanto a densidade por princípio de Arquimedes quanto a densidade geométrica verificaram um comportamento de elevação da densidade em relação ao aumento do teor de alumínio. Esse comportamento novamente se deve à oxidação das partículas menores de Al nos compactos, elas oxidam gerando novos cristais ainda menores de alumina que se ligam por *bridging* às aluminas iniciais, aumentando a interação entre elas, dentro dos corpos tratados termicamente. Logo, essa ligação por *bridging* resultou em corpos mais densificados em relação às demais amostras com menores teores de alumínio. Todas amostras apresentaram o mesmo mecanismo de densificação, mas se diferenciaram em intensidade. Os valores da densidade geométrica foram maiores do que os valores obtidos via Arquimedes, isso pode ter sido causado pela falta de geometria perfeita, pela distorção dimensional da peça, não planicidade ou até mesmo pela falta de paralelismo entre as duas faces planas do meio poroso.

4.2.3 Porosidade

Segundo os dados obtidos pelos cálculos das porosidades, pode-se observar que todas as estruturas apresentaram um valor de porosidade dentro do intervalo de utilização para sistemas de bombeamento capilar (44-80%). Tanto na porosidade por princípio de Arquimedes quanto na porosidade geométrica foi possível verificar um comportamento de queda da porosidade em relação ao aumento do teor de alumínio.

Esse comportamento confirma o resultado já discutido anteriormente no caso da densidade aparente. A estrutura formou novas ligações por *bridging* entre partículas de alumina recém-formadas – pela oxidação do alumínio - e as partículas

de alumina iniciais, isso contribuiu para redução no valor da porosidade, pois essas novas ligações refinam a estrutura. Novamente os valores da porosidade geométrica foram maiores do que os valores obtidos via Arquimedes, isso pode ter sido causado pelos mesmos motivos descritos anteriormente no tópico de densidade aparente.

4.2.4 Tensão de Ruptura a Flexão

Com base nos resultados da

Tabela 7, novamente, pode-se observar que as maiores resistências à ruptura por flexão se encontraram nas amostras com maiores teores de alumínio na fabricação das amostras. Isso se deve ao fato das novas ligações por *bridging* das recém-formadas partículas de alumina, provenientes da oxidação do alumínio com a alumina já presente na composição inicial. Tal processo foi possível em virtude do tratamento térmico aplicado durante a fabricação via sinterização reativa.

Essas ligações aumentaram a interação entre as partículas da amostra e, conseqüentemente, levaram a diferentes morfologias estruturais dentro desta, especialmente em relação à morfologia dos poros. Sabe-se que diferentes morfologias e frações volumétricas levam a comportamentos mecânicos específicos.

Sendo assim, os maiores teores de alumínio culminaram em maiores interações entre as partículas durante o período de oxidação. Isso fez com que amostras com 40% de alumínio apresentassem valores de resistência de ruptura à flexão de 3 pontos 3 vezes maiores do que as amostras com apenas 10% desse elemento na composição inicial.

Apesar das demais amostras apresentarem menores resistências em relação à amostra com 40% de alumínio, ainda assim apresentaram um aumento na resistência mecânica em relação às amostras não preparadas pela técnica de sinterização reativa.

4.2.5 Pressão Capilar

Os resultados do teste do bolhamento revelaram que não foi possível determinar com precisão a pressão capilar em relação a interferência A, pois o manômetro utilizado para a avaliação não tinha resolução suficiente, fato esse que

dificultou a qualificação dessa relação de interferência, mesmo assim pode-se aferir uma pressão capilar de 40kPa.

A interferência B apresentou uma pressão capilar de 80kPa, esse valor de pressão capilar a qualifica para utilização em circuitos bifásicos trocadores de calor.

Outro fato a se destacar foi que a montagem das estruturas com as relações A e B foi mais fácil se comparada com as demais, isso é relevante a se destacar, pois essa montagem evita a quebra da estrutura e deformação no tubo do evaporador.

Por fim a utilização das interferências C e D levaram a uma difícil montagem da estrutura porosa dentro do evaporador o que levou a quebra da estrutura porosa e deformações ao longo do tubo, logo tais relações de interferência não são indicadas para tal aplicação.

4.2.6 Análise da superfície da fratura

Utilizando a análise macroscópica proveniente das imagens, pode-se dizer que todas as amostras testadas sofreram fratura frágil por excesso de carga. Sabe-se que materiais cerâmicos são inerentemente frágeis.

Essa fratura se deu no local de aplicação da carga, ou seja, no centro das amostras. Com base nas imagens obtidas pelo estereoscópio foi possível notar inclusões de alumínio nas amostras, sendo encontradas em maior quantidade nas amostras com maiores teores iniciais desse elemento. A presença de tais inclusões e de poros servem como concentradores de tensão que atuam como agentes de nucleação de trincas no interior das amostras. Quando a trinca atinge um valor determinado, ela inicia sua propagação pelos grãos da estrutura levando a fratura catastrófica.

A fratura frágil observada nas amostras é comum nessa categoria de materiais pelo fato de tal categoria não apresentar mecanismos de deformação para impedir a propagação rápida da trinca.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estruturas cerâmicas porosas foram obtidas com sucesso, por meio do método de fabricação escolhido, para a utilização em circuitos bifásicos de troca de calor. A sinterização reativa proporcionou a fabricação de estruturas com porosidade média de 45 a 60%.

Também foi observada, a partir dessa técnica de fabricação, uma expansão de volume das estruturas porosas associada com a presença de alumínio na composição inicial. Isso ocorreu devido à oxidação das partículas desse metal presentes na estrutura porosa cerâmica durante o tratamento térmico.

Existiu uma diferença entre o valor teórico da expansão, obtido matematicamente, do valor expansão experimental. Acredita-se que essa diferença ocorreu porque a equação utilizada para tal determinação considera todo o processo de sinterização, fato esse que não ocorreu em sua totalidade nas estruturas fabricadas.

Os valores de densidade aparente e porosidade, determinadas por diferentes princípios, confirmaram que a maior presença de alumínio na composição inicial leva a estruturas mais densas e, conseqüentemente, menos porosas. Os princípios de Arquimedes e Geométrico utilizados são técnicas úteis para ajudar a determinar a densidade aparente e a porosidade.

Com as estruturas mais refinadas, ocorreu a elevação da resistência a ruptura sob flexão de 3 pontos. Assim, foi verificado, novamente, que as estruturas com maior presença de alumínio na composição inicial apresentaram resistências à ruptura 3 vezes maiores que as estruturas em menor quantidade do metal.

A análise da superfície de fratura das amostras submetidas ao ensaio mecânico de flexão por três pontos mostrou que ocorreu uma fratura frágil por excesso de carga. Também se observou pequenas inclusões de alumínio no interior das amostras; essas inclusões podem ter causado uma concentração de tensão nestas e, conseqüentemente, a nucleação de trincas que causaram a falha catastrófica.

O teste de bolhamento revelou que o valor da relação de interferência utilizada implica diretamente no valor de pressão capilar obtida pelo teste da amostra. Dos valores testados, todos apresentaram capacidade de resistir a pressões superiores à pressão utilizada em circuitos bifásicos de troca de calor.

Assim, a opção de qual relação utilizar recai ao fato da facilidade, ou não, da montagem da estrutura porosa cerâmica, com tal relação, no evaporador do circuito.

Foram encontrados valores de pressão capilar na ordem de 40kPa e 80kPa para determinadas relações de interferência.

Para trabalhos futuros, sugere-se os seguintes temas:

- Avaliação micro estrutural da morfologia dos poros formados;
- Avaliação e Simulação da transferência de calor presente no evaporador com a estrutura porosa cerâmica;
- Determinação das dimensões da estrutura porosa cerâmica para ser utilizado em um LHP;
- Desenvolvimento de um LHP para utilização de estrutura porosa cerâmica;
- Caracterização mecânica das estruturas porosas cerâmicas, produzidas via técnica de sinterização reativa, a partir da análise de Weibull.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6158/1995: Sistema de tolerâncias e ajustes. Rio de Janeiro, Brasil, 1995. 79p.

BAZZO, E., GROLL, M., BROST, O., & COLLE, S. (1997). Bombas Capilares Aplicadas a Circuitos de Transferência de Calor de Doble-Fase. *Informacion Tecnológica*, 8(Fascículo 4), 355-364.

BERTI, L. F. (2006). *Fabricação e Caracterização de Elementos Porosos para Sistemas Bifásicos de Transferência de Calor Passivos*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BERTI, L. F. (2012). *RBMAO: Uma nova rota de produção para cerâmicas porosas*. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

CAMARGO, H. V. (2004). *Avaliação experimental e teórica de elementos porosos aplicados a sistemas de bombeamento capilar*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CLAUSSEN, N., & WU, S. (1992). Processing and Properties of Reaction-Bonded Al₂O₃ (RBAO) and Mullite Ceramics. In: T. HIRANO, G. MESSING, & H. HAUSNER (Eds.), *Ceramic transactions* (Vol. 22, pp. 631-646). Westerville.

CLAUSSEN, N., LE, T., & WU, S. (1989). Low-shrinkage reaction-bonded alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 5(1), 29–35.

CLAUSSEN, N., TRAVITZKY, N. A., & WU, S. (1990). Tailoring of Reaction-Bonded Al₂O₃ (RBAO) Ceramics. In: *A Collection of Papers Presented at the 14th Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials: Ceramic Engineering and Science Proceedings* (7-8 ed., Vol. 11, pp. 806-820). John Wiley & Sons, Inc.

JANSSEN, R., CLAUSSEN, N., SCHEPPOKAT, S., & ROGER, M. (2002). Reaction bonding and reaction sintering—a way to low cost manufacturing of alumina bases components. *Intermaterial*, 15(4), 75–79.

KNECHTEL, M., CLAUSSEN, N., & CAHN, R. (Jun. 15 de 1995). Reliability of structural ceramics [and discussion]. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, 352(1697), 469-483.

KU, J. (8-11 de Agosto de 1993). Overview of Capillary Pumped Loop Technology. *29th National Heat Transfer Conference*, 236.

- MAYDANIK, Y. (2005). Loop heat pipes. In: *Applied Thermal Engineering* (Vol. 25, pp. 635-657).
- NICHOLAUS, N., & RAY, R. (1970). Porous Stainless Steel - The Unique Filter Medium. In: *Modern Developments in Powder Metallurgy* (Vol. 5, pp. 187-199).
- ORTEGA, F. S., PAIVAL, A. M., RODRIGUES, J. A., & PANDOLFELLI, V. C. (2003). *Propriedades mecânicas de espumas cerâmicas produzidas via gelcasting*. Universidade Federal de S. Carlos - DEMa.
- RASSAMAKIN, B. M., PIMENNY, Y. N., KHAYRNASOV, S. M., & SMIRNOV, G. F. (2002). Research and Development of Aluminum Loop Heat Pipes Operation Characteristics. *International Heat Pipe Conference, 12 Anais*. Russia.
- Reay, D., & Kew, P. (2006). *Heat Pipes - Theory, Design and Applications* (5 ed.). Burlington: Butterworth-Heinemann.
- SAIED, W. (2006). *Fundamentals of Heat Pipes With Applications to Electronics Cooling*. Acesso em 20 de 05 de 2015, disponível em Fundamentals of Heat Pipe: <http://www.engr.sjsu.edu/ndejong/ME%20146%20files/FundamentalsofHeatPipesII.ppt>
- SANTOS, P. H. (Abril de 2010). Development of LHPs with ceramic wick. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1784-1789.
- STENGER, F. J. (1966). Experimental feasibility study of water-filled capillary-pumped heat transfer Loops. *NASA TM-X-1310, NASA Lewis Research Center*.
- Stoecker, W. F., & Jones, J. W. (1985). *Refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: McGraw Hill do Brasil.
- TABALIPA, F. (2005). *Fabricação e caracterização de elementos porosos cerâmicos para aplicação em bombeamento capilar*. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- WU, S., & CLAUSSEN, N. (1990). Fabrication of low-shrinkage mullite-zirconia composites. *Proceedings of the British Ceramic Society*, 45(1), 91-95.
- WU, S., HOLZ, D., & CLAUSSEN, N. (1993). Mechanisms and kinetics of reaction bonded aluminium oxide ceramics. *Journal of the American Ceramic Society* v.76 n.4, pp. 970-980.