



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



WALBER MORAIS DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE ROCHAS PARA UTILIZAÇÃO
EM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA**

JOÃO PESSOA – PB

2020

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° XX

WALBER MORAIS DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE ROCHAS PARA UTILIZAÇÃO
EM ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel.

JOÃO PESSOA – PB

2020

S586c Silva, Walber Morais da.

Caracterização térmica de rochas para utilização em armazenamento de energia térmica / Walber Morais da Silva. - João Pessoa, 2020.

106f. : il.

Orientação: José Maurício Alves de Matos Gurgel.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/PPGER.

1. Energias renováveis. 2. Energia térmica - Armazenamento. 3. Meios Porosos. 4. Rochas. I. Gurgel, José Maurício Alves de Matos. II. Título.

UFPB/BC

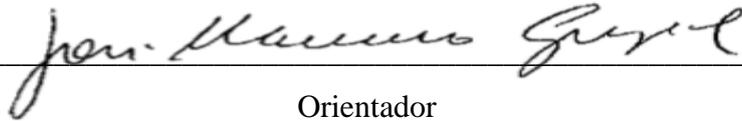
CDU 620.91(043)

WALBER MORAIS DA SILVA

**CARATERIZAÇÃO TÉRMICA DE ROCHAS PARA UTILIZAÇÃO EM
ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TÉRMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28/08/2020.



Orientador

Prof. Dr. José Maurício Gurgel – UFPB.



Membro Interno

Prof. Dr. João Alves de Lima – UFPB.



Membro Externo

Prof. Dr. Herbert Melo Vieira.

Orientador

Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel

JOÃO PESSOA – PB

2019

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho a Deus, a
Intercessão de Nossa senhora de Fátima e a
minha família.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que sempre ilumina a minha longa caminhada, por me proporcionar força, perseverança para vencer os obstáculos da vida.

À minha esposa, Edilene Pereira do Rio Morais, pelo amor e incentivo.

Ao meu pai, Waldomiro Alves da Silva, por ser um companheiro de todos os dias.

Aos meus filhos, Beatriz, Bianca e Emanuell, por cederem o tempo deles comigo, para a realização desse trabalho.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. José Maurício Alves de Matos Gurgel por me aceitar como orientando, ter me apoiado nos momentos mais difíceis e compreendido as minhas limitações.

Agradeço ao Prof. Dr. Herbert Melo Vieira pela sua ajuda no início deste trabalho e por sempre se mostrar solidário nos momentos que precisei.

Agradeço ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos do DEER/CEAR da UFPB, a pessoa da Profa. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva, por ter disponibilizado o seu tempo na realização de ensaios que contribuíram para a concretização desse trabalho.

RESUMO

O presente trabalho trata da caracterização térmica de uma amostra de brita, coletada no Semiárido brasileiro, com o intuito de serem utilizadas em sistemas de armazenamento térmico de calor sensível, oferecendo uma alternativa de material com baixo custo e alta disponibilidade. O estudo teórico e experimental permite investigar o potencial térmico de rochas do Semiárido no Nordeste brasileiro que podem ser utilizadas como materiais de enchimento no sistema de estocagem de energia térmica em temperaturas menores ou maiores que 100 °C. O aparato experimental constitui-se de uma bancada composta de um leito fixo cilíndrico, onde foram avaliadas a condutividade térmica pelo método estacionário e a difusividade térmica pelo método transiente. O modelo de Bauer-Schlünder foi utilizado para determinar a condutividade das partículas sólidas, através da técnica de identificação de variáveis. O efeito da variação da porosidade próximo da parede do leito foi considerado, assim como o estudo da variação das formas das partículas no resultado da condutividade térmica de brita. A difusividade térmica foi determinada pelo método experimental de condução do calor em regime transiente, utilizando o método de diferenças finitas explícita como solução da equação de transferência de calor unidirecional em coordenadas cilíndricas, e a implementação de um algoritmo no programa computacional MATLAB R2016a[®]. A técnica termoanalítica de DSC foi utilizada para determinar o calor específico da brita. Resultados da condutividade, difusividade térmica e o calor específico da amostra de britas evidenciaram eficiência nas propriedades térmica, com isso, apresentou possibilidade na utilização em sistemas de armazenamento térmico de calor sensível.

Palavras-Chave: Armazenamento de energia térmica, Meios porosos, Rochas

ABSTRACT

The present work deals with the thermal characterization a gravel sample, collected in the Brazilian Semiarid, in order to be used in thermal sensitive heat storage systems, offering an alternative material with low cost and high availability. The theoretical and experimental study allows investigating the thermal potential Semiarid stones in northeastern Brazil that can be used as filling materials in the thermal energy storage system at temperatures lower or greater than 100 °C. The experimental apparatus consists of a bench composed of a fixed cylindrical bed, where the thermal conductivity was evaluated by the stationary method and the thermal diffusivity by the transient method. The Bauer and Schlünder models were used to determine the variable identification technique and the conductivity of solid particles. The effect variation in porosity close to the bed wall was considered, as well as the study of the variation particle shapes in the result the thermal conductivity crushed stone. The thermal diffusivity was determined by the experimental method conducting heat in a transient regime, using finite difference method explicit in solution, presented in the unidirectional heat transfer equation in cylindrical coordinates, and the implementation an algorithm in the computer program MATLAB R2016a[®]. The DSC thermoanalytical technique was used to determine the specific heat crushed stone. Results of conductivity, thermal diffusivity and specific heat in samples crushed stones showed efficiency in the thermal properties, with this, it showed viability in the use thermal sensitive heat storage systems.

Key words: Thermal energy storage, Porous media, Crushed stone

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principais partes e componentes de uma usina CSP.....	22
Figura 2. Usina CSP (a) Torre Solar e (b) Calhas Parabólica, com sistema TES.....	22
Figura 3. Esquema do sistema de TES proposto para recuperação do calor residual em uma siderúrgica.....	23
Figura 4. Esquema do leito de rocha e modelo da habitação	24
Figura 5. Sistemas de tecnologias de TES.....	27
Figura 6. Sistema TES de leito fixo.....	28
Figura 7. Esquema da operação do sistema de armazenamento de calor em leito de rochas.....	34
Figura 8. Três diferentes exemplos de estratificação em leito fixo para a mesma quantidade de calor armazenado (a) estratificação alta (b) estratificação moderada e (c) sem estratificação.	35
Figura 9. Fenômeno de transferência de calor dentro do leito de rochas.	36
Figura 10. Ciclo das rochas. Rochas ígneas, metamórficas, sedimentares e sedimentos não consolidados.....	37
Figura 11. Formações calcárias no torcal de antequera, na Espanha(a) e formações de arenito no Arizona, no EUA (b).	42
Figura 12: Delimitações do Semiárido do Brasil.	43
Figura 13. Mapa geológico do Semiárido do Brasil.....	44
Figura 14. Corte transversal do equipamento construído.	48
Figura 15. Imagem do dispositivo do leito granular.....	49
Figura 16. Esquema de montagem dos equipamentos para a determinação da condutividade térmica.....	50
Figura 17. Aspecto visual da amostra de brita AB-01, Brita n 01.....	51
Figura 18. Espectro de difração de raios X do agregado AB-01.....	52
Figura 19. Microscopia eletrônica de varredura da seção polida do agregado AB-01.	52
Figura 20. Esquema da região do leito com porosidade variável; a) seção longitudinal do leito e b) seção transversal do leito.....	54

Figura 21. Célula unitária do modelo Bauer-Schlünder.	61
Figura 22. Relação <i>z versus r</i> , para fator de deformação $B = 1$	63
Figura 23. Relação <i>z versus r</i> , para fator de deformação $B = 0,2$	63
Figura 24. Relação <i>z versus r</i> , para fator de deformação $B = 3$	63
Figura 25. Porosidade versus a distância da parede do leito (Diâmetro da partícula).....	73
Figura 26. Amostra de brita. (a) britas com tamanhos grandes; (b) britas com tamanhos pequenos.	75
Figura 27. Perfil de temperatura, regime estacionário; potência 5W.	76
Figura 28. Valores dek_b (W/mK) em regime estacionário, com correção dos posicionamentos dos sensores; fluido Ar, 100 kPa.	77
Figura 29. Condutividade térmica efetiva do leito, k_b sob pressão ar variado de 5,6 Pa a 100 kPa.....	78
Figura 30. Estudo de sensibilidade do modelo BS para várias condutividade k_s . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $\epsilon_b = 0,41$; $\gamma = 0,45$; $\rho_k^2 = 0,001$	81
Figura 31. Estudo de sensibilidade do modelo BS para várias porosidade ϵ_b . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar; $k_s = 1,29$ W/mK; $\gamma = 0,45$; $\rho_k^2 = 0,001$	82
Figura 32. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários ρ_k^2 . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s = 1,29$ W/mK; $\gamma = 0,45$; $\epsilon_b = 0,41$	82
Figura 33. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários coeficientes de acomodação, γ . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s = 1,29$ W/mK; $\epsilon_b = 0,41$; $\rho_k^2 = 0,001$	82
Figura 34. Estudo de sensibilidade do modelo BS para a variadas concentrações de partículas com diâmetro, $D1 = 10,21$ mm. Forma da partícula: Mistura binária de esferas; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s = 1,29$ W/mK; $\epsilon_b = 0,41$; $\rho_k^2 = 0,001$; $\gamma = 0,45$	83
Figura 35. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários k_s ; Pressão: 1 atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $\epsilon_b = 0,41$; $\rho_k^2 = 0,001$; $\gamma = 0,45$	84

Figura 36. Estudo de sensibilidade do modelo BS para várias porosidades; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\rho_k^2=0,001$; $\gamma=0,45$..	84
Figura 37. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários ρ_k^2 ; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\epsilon_b=0,41$; $\gamma=0,45$.	84
Figura 38. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários coeficientes de acomodação; Pressão: 1 atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\epsilon_b=0,41$; $\rho_k^2=0,001$.	84
Figura 39. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma esférica; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,405$ e $D=8,6\text{mm}$.	87
Figura 40. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma quebrada; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,43$ e $D=8,6\text{mm}$.	87
Figura 41. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma cilíndrica; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,60$; $\rho_k^2=0,006$; $\epsilon_b=0,42$ e $D=5,52\text{mm}$.	87
Figura 42. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita com mistura binária de esferas; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,50$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,43$ e $D=10,21$ e $7,46$ mm.	87
Figura 43. Perfil da temperatura, para diferentes valores de α_b , produzidas pelo método numérico em comparação com o perfil de temperatura obtido experimentalmente, T (R2).	89
Figura 44. Termogramas produzidos pelo método experimental transiente. A linha sólida é a curva da solução numérica, $\alpha_b=2,37.10^{-7}\text{m}^2/\text{s}$ que sobrepõe os pontos registrados pelo sensor R2 e sujeita as condições de contorno registrados pelos sensores R1 e R4.	90
Figura 45. Variação do calor específico (c_p) para amostra de brita AB-01.	91
Figura 46. Curva DSC da amostra de brita AB-01. Taxa de aquecimento de 20 °C/min; vazão do gás de 50 mL/min; massa da amostra de $64,360$ g.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados publicados do potencial dos materiais de armazenamento de calor sensível.	26
Tabela 2. Classificação das rochas ígneas quanto ao tipo de rocha, percentual de SiO ₂ , granulacão e cor.	39
Tabela 3. Composição química da amostra AB-01 e suas frações.	51
Tabela 4. Disposição das sondas no leito fixo.	58
Tabela 5. Aferição do posicionamento das sondas dentro do leito fixo.	59
Tabela 6. Resultado experimental da massa específica média do leito de brita.	74
Tabela 7. Dimensão características das partículas de brita.	75
Tabela 8. Condutividade térmica efetiva do leito na presença do gás ar.	77
Tabela 9. Condutividade térmica efetiva do leito, k_b , na presença do gás hélio, metano e ar; 100 kPa; 300K.	79
Tabela 10. Condutividade térmica da partícula sólida, k_s , porosidade e parâmetros secundários obtidos pelo modelo BS, com leito de brita/ar.	80
Tabela 11. Condutividade térmica do leito, do gás e da partícula sólida.	85
Tabela 12. Condutividade térmica efetiva do leito de brita, k_b , calculada pelo modelo BS e pela correlação de Gonzo (2002), para k_s na presença do ar, metano e hélio e $\varepsilon_b = 0,41$	86
Tabela 13. Erro médio absoluto e desvio padrão das curvas obtidas pelo modelo B.S.	88
Tabela 14. Erro médio e desvio padrão dos erros entre as curvas numéricas e a curva $T(R2, t)$, da Figura 43	89
Tabela 15. Resultados experimentais da medida da porosidade média do leito de brita.	99
Tabela 16. Dimensões do Becker, cilindro da parte central e região anular próxima a parede do leito.	100
Tabela 17. Resultado do cálculo da porosidade por integração numérica.	100
Tabela 18. Calor específico da amostra de brita AB-01, na faixa de temperatura de 26 a 30°C	102

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

a	Razão dos calores específicos do gás
B	Fator de deformação do Modelo de Bauer e Schlunder
C	Fator de forma do Modelo de Bauer e Schlunder
D	Dimensão característica da partícula.
DE	Diâmetro externo da sonda
D_r	Diâmetro do disco do aparelho de testes de cilindros concêntricos
d_c	Diâmetro da superfície de contato
g	Coefficiente presente no cálculo da razão da condutividade do gás pela condutividade aparente do gás
h	Altura do leito
P	Pressão
R	Raio
T	Temperatura
w	Potência dissipada no centro da amostra
ε	Porosidade do leito
ϵ	Emissividade
γ	Coefficiente de acomodação
δ	Livre percurso médio do gás
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
ξ	Parâmetro função da dispersão granulométrica
φ	Fração da superfície de contato
ρ	Massa específica

ρ_k	Pontos de contato sólido relativo ao diâmetro da superfície de conta e a dimensão característica da partícula no modelo de Bauer Schlünder
k_g	Condutividade térmica do gás
k_g^*	Condutividade térmica aparente do gás
K_b	Condutividade térmica do Leito
K_s	Condutividade térmica do grão
k_{so}	Condutividade térmica da fase sólida gasosa
K_r	Condutividade térmica devido à radiação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1. OBJETIVOS.....	20
1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.2.1. Sistemas de armazenamento de energia térmica	21
1.2.2 Classificação dos sistemas TES.....	25
1.2.3. Sistemas de armazenamento em leito fixo	28
1.2.4. Armazenamento em leito fixo de rocha	33
1.2.5. Rochas	36
1.2.6. Rochas ígneas	37
1.2.7. Rochas metamórficas.....	40
1.2.8. Rochas sedimentares	41
1.2.9. Geologia do Semiárido brasileiro	42
1.2.10. Recursos geológicos	43
1.2.11. Modelos preditivos da condutividade térmica em meios porosos	45
1.3. MATERIAL E MÉTODOS	48
1.3.1 Descrição do equipamento	48
1.3.2 Material mineral	50
1.3.3. Medida da porosidade do leito de brita	52
1.3.4. Determinação da massa específica do leito.....	55
1.3.5. Determinação da condutividade térmica do leito: regime estacionário.	56
1.3.6. Aferição do sistema de aquisição de dados.....	57
1.3.7. Aferição das sondas	57
1.3.8. Resistência usada no centro do reator	57
1.3.9. Aferição dos posicionamentos das sondas	58
1.3.10. Estimativas de erro do método estacionário.....	60

1.3.11. Determinação da condutividade térmica da partícula sólida	60
1.3.12. Modelo Bauer-Schlünder	61
1.3.13. Mensuração da condutividade térmica residual	66
1.3.14. Determinação da difusividade térmica do leito.....	67
1.3.15. Modelagem matemática	68
1.3.16. Método numérico	69
1.3.17. Algoritmo	71
1.3.18. Determinação do calor específico do leito.....	71
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
1.4.1 Porosidade do leito fixo de brita	73
1.4.2 Caracterização física.....	74
1.4.3. Massa específica do leito de brita	74
1.4.4. Dimensão característica das partículas de brita	74
1.4.5. Condutividade térmica efetiva do leito de brita.....	76
1.4.6. Condutividade térmica efetiva do leito com ar	76
1.4.7. Condutividade térmica residual do leito.....	78
1.4.8. Condutividade térmica efetiva do leito com outros gases	79
1.4.9. Condutividade térmica do sólido (grão) utilizando o modelo de BS..	79
1.4.10. Estudo das formas dos grãos do leito de brita	86
1.4.11. Determinação da difusividade térmica do leito de brita	88
1.4.12 Método experimental em regime transiente	88
1.4.13. Determinação do calor específico	90
1.5. CONCLUSÕES.....	92
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICES	99
APÊNDICE A - Cálculo da porosidade intragranular do leito de brita.....	99
APÊNDICE B – Resultados obtidos por termoanálise.....	101

APÊNDICE C – Discretização da equação unidimensional de Fourier em coordenadas cilíndricas.....	103
APÊNDICE D – Algoritmo da equação de calor para coordenadas cilíndricas unidirecional por diferenças finitas explícita.....	104

1. INTRODUÇÃO GERAL

A energia faz parte da necessidade evolutiva da humanidade, com o aumento populacional, as preocupações ambientais, o desenvolvimento tecnológico, a necessidade do menor consumo de combustíveis fósseis, as mudanças climáticas, tudo integrando a necessidade de evoluir, crescer de forma sustentável e inteligente, conduz para utilização de fontes de energias renováveis, que possam substituir e/ou cooperar com as fontes de energias convencionais (NASCIMENTO et al., 2012).

Além do mais, os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) utilizados para a geração de calor e eletricidade, tem seu uso cada vez mais restrito, devido aos impactos ambientais. Ressaltando, o gás que tem efeito negativo sobre o efeito estufa, pois é liberado pelos combustíveis fósseis durante o processo de combustão, ajudando no aquecimento global e ameaçando a existência da vida no planeta Terra (EWEA, 2010).

Portanto, a utilização de energias renováveis, torna-se uma solução chave encontrada para atender a demanda de energia mundial, sem aumentar a emissão de gases do efeito estufa. Atualmente as principais formas de energia utilizada pelo consumidor final são: elétrica, mecânica e térmica. Para realizar a transformação dessas energias, se faz necessário uma fonte primária de energias renováveis tais como: hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomassa, biogás e maremotriz (BRASIL, 2010).

Uma grande fonte primária e inesgotável de energia renovável é a energia solar, embora seja intermitente e não disponível durante a noite e em períodos nublados. Pode-se levar em consideração que esta indisponibilidade deve ser adaptada de alguma forma, para poder gerar de forma permanente a energia e ser utilizada de forma diária para o consumo humano (NASCIMENTO, 2019).

Uma das alternativas para solucionar esses problemas, são os sistemas de armazenamento térmico *Thermal Energy Storage* (TES), que são capazes de equilibrar a diferença que pode ocorrer entre a disponibilidade da energia renovável e o seu consumo. O sistema TES torna possível o armazenamento de energia térmica de uma fonte primária, o sol, como também, de uma fonte secundária, calor residual industrial (ALMENDROS-IBÁÑEZ et al., 2018). Possibilitando assim a transformação contínua de energia, independente das particularidades temporais.

Entre os diferentes tipos de TES (Químico e Térmico), o sistema de armazenamento de calor sensível em leitos fixos de rochas, se apresenta como de baixo custo, não inflamável,

atóxico, fácil disponibilidade e atuam como superfície de transferência de calor e meio de armazenamento (CASTRO et al., 2016).

Nesse sistema de transferência de calor ou *Heat Transfer Fluid* (HTF), flui através do leito fixo da rocha e troca de calor através do contato direto. O contato direto não somente elimina a necessidade de um custo adicional com um trocador de calor, como também aumenta a superfície de contato entre o HTF e o meio de armazenamento térmico (PAES, 2019).

O óleo ou o ar, podem ser utilizados como HTF, o primeiro bastante utilizado em usinas heliotérmicas e segundo, tem sido utilizado em sistemas térmicos de aquecimento solar em residências. A escolha das rochas adequadas como material de preenchimento do leito fixo, pode reduzir a quantidade de HTF em até 80% e aumentar eficiência de armazenamento térmico do leito. A disponibilidade local, custo, massa específica, capacidade térmica e a condutividade térmica, são critérios decisivos para a escolha da rocha como material de enchimento do leito fixo (MONTEIRO FILHO, 2018).

Para a caracterização térmica (condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico) uma bancada experimental, formada por um reator cilíndrico vertical, com o material de enchimento no seu interior, desenvolvida para trabalhar em condições de regime estacionário e transiente, com gás em diferentes pressões, permite medir a condutividade térmica do leito fixo, utilizando esse valor no modelo de Bauer-Schlünder (BS) para determinar a condutividade da partícula sólida, através de técnica de identificação de variáveis (SILVA, 2018).

As condições em regime transiente, permitem a determinação da difusividade térmica através da utilização do método numérico de diferenças finitas explícita para a solução da equação de calor em coordenadas cilíndricas e um algoritmo implementado no programa computacional MATLAB R2016a[®]. O calor específico do material de enchimento do leito é determinado pela técnica termoanalítica de Calorimetria Explanatória Diferencial (DSC). Portanto, os estudos experimentais possibilitarão a avaliação térmica da amostra coletada, permitindo a sua utilização em demais testes que validarão a rocha para armazenamento de energia térmica.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral consistiu em caracterizar termicamente uma amostra de rochas do Semiárido brasileiro para serem utilizadas em sistema de estocagem de energia térmica de calor sensível nas aplicações de sistemas térmicos residenciais, industriais e usinas heliotérmicas (CSP).

Os objetivos específicos desse trabalho foram:

- Adaptar a bancada experimental para determinação da condutividade e difusividade térmica de leitos granulares (rochas);
- Definir o domínio físico do estudo e suas propriedades termofísicas;
- Observar a funcionalidade da bancada experimental na determinação da difusividade e na condutividade térmica da rocha;
- Analisar a solução numérica da equação do modelo matemático para a determinação da difusividade térmica;
- Avaliar o efeito da variação da porosidade próxima a parede do leito;
- Verificar a influência da forma e distribuição do tamanho das partículas sólidas no resultado da condutividade térmica da pedra.

1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.2.1. Sistemas de armazenamento de energia térmica

A geração de energia térmica equivale ao tempo da geração de energia térmica e o seu consumo, pela diferença de custo da energia entre as horas de pico e fora de pico e (ou) a distância entre a fonte geradora e o local de consumo, resultando na maior queima de combustível para preencher essas lacunas, e conseqüentemente aumentando a poluição ambiental (emissão de gases de efeito estufa) e aumento do custo de combustível fóssil (ALVA; LIN; FANG, 2018).

Os sistemas de armazenamento de energia térmica (Thermal Energy Storage – TES) desponta como fator chave para resolver o problema da intermitência da geração de energia térmica, armazenando calor até o seu consumo, permitindo uma utilização contínua e sem flutuações. Pois os TES fornecem benefícios econômicos e ambientais devido à redução da queima de combustíveis fósseis (ACHKARI; FADAR, 2020).

Segundo Alva et al. (2018), todas as atividades humanas geram calor em pequena e grande escala, e devido as implicações técnicas e econômicas, ainda não é viável armazenar calor para as atividades de pequena escala de geração de energia térmica como: o gás de cozinha, combustível, mas atividades macros, tais como: energia térmica solar, energia geotérmica, termoeletricas, usinas nucleares, recuperação de calor residual industrial, climatização de residências, etc., os sistemas TES podem ser implantados de forma economicamente viável.

Os sistemas TES tem uma aplicação chave nas usinas Termosolares, conhecidas como energia solar concentrada (Concentring Solar Power - CSP). Esse tipo de usina fixa a radiação solar direta para aquecer um fluido, denominado de HTF (*Heat Transfer Fluid*), que tem a função de produzir vapor superaquecido ou fornecer calor para outro fluido de trabalho que faz funcionar uma turbina conectada a um gerador, produzindo energia elétrica (BENOIT et al., 2016).

O sistema de armazenamento de energia térmica acoplado a CSP, reduz a incompatibilidade entre o fornecimento de energia solar e a demanda de energia, permitindo uma melhor disponibilidade de forma continua e independente das variáveis temporais. A Figura 1, mostra alguns dos componentes que compõem as três principais partes de uma usina CSP:

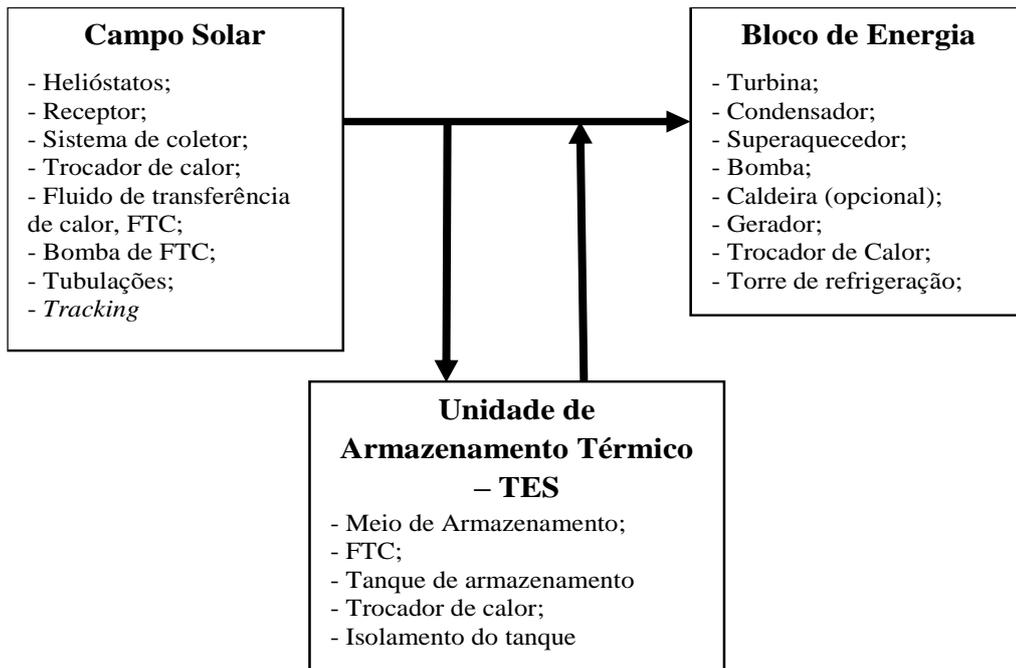


Figura 1. Principais partes e componentes de uma usina CSP.
Fonte: Própria.

Os quatro principais tipos de tecnologia CSP são: Calhas parabólicas, Torre solar, Disco parabólico e Refletor linear Fresnel. Todos podem ser integrados com armazenamento de energia térmica, como pode ser demonstrado na Figura 2 (a) o modelos de uma usina CSP, do tipo Torre solar, que utiliza o sistema termoclina para armazenamento de energia térmica, enquanto a Figura 2 (b), apresenta o modelo de uma usina CSP do tipo Calhas Parabólicas acoplada a um sistema de TES composto de dois tanques de sal fundido.

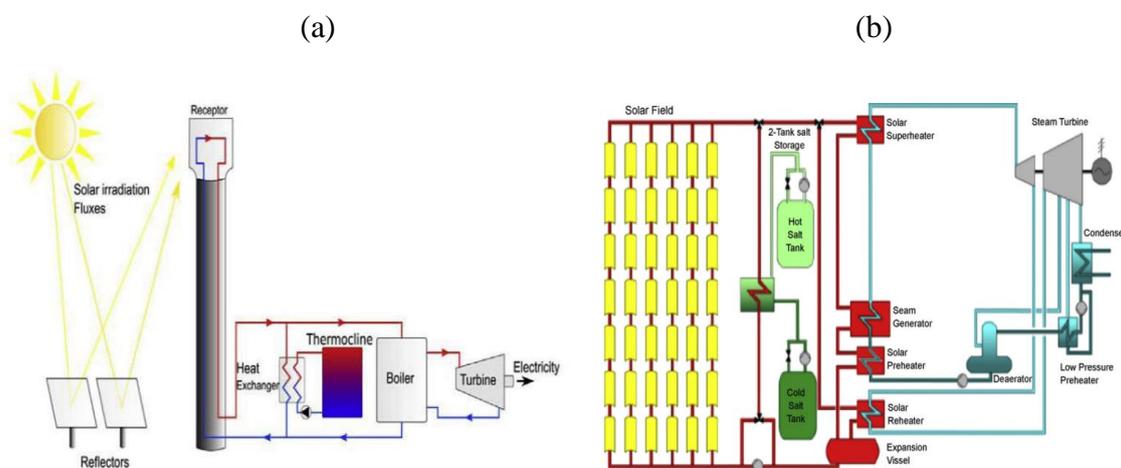


Figura 2. Usina CSP (a) Torre Solar e (b) Calhas Parabólica, com sistema TES.
Fonte: Adaptado de Alva et al. (2018); Kuravi et al. (2013).

Para Miró et al. (2016), os sistemas de TES são tecnologias que devem ser utilizadas na recuperação das perdas de calor industrial eliminando o descompasso entre a energia liberada e sua demanda de calor, causada por uma situação geográfica ou temporária. Os sistemas TES atuam recuperando e estocando a energia para um uso posterior.

Uma revisão geral dos sistemas de TES utilizados na recuperação de calor residual industrial é descrito por Miró et al. (2016), quando estudaram mais de 50 indústrias que utilizavam o sistema de TES para a recuperação calor residual. Segundo eles, dependendo da distância entre a fonte de calor residual e unidade de consumo, os sistemas TES podem ser no local, “on-site”, ou a fonte de calor residual que pode ser transportado até o sistema TES, “off-site”. Portanto, o estudo demonstra que a maioria das indústrias preferem o sistema TES “on-site” e que as siderúrgicas têm o sistema TES bastante enraizado, isso devido à grande quantidade de emissão gases de exaustão de alta temperatura.

Segundo Ortega; Rodríguez (2019), esse tipo de tecnologia chega a uma eficiência entre 65% a 85% na recuperação de calor residual em siderúrgicas. Os autores realizaram um estudo de caso para recuperação do calor dos gases de exaustão que saem a alta temperatura (1.200 °C) da fornalha de arco elétrico de uma siderúrgica.

Verificaram que o material utilizado para armazenamento de energia térmica foi a escória, produto produzido na própria planta industrial. Visto que, a energia térmica armazenada, alcança uma temperatura em torno de 700 °C, sendo utilizada, de acordo com a demanda do processo na produção de vapor, pré-aquecimento de sucatas, dentre outras, de acordo com o modelo apresentado na Figura 3.

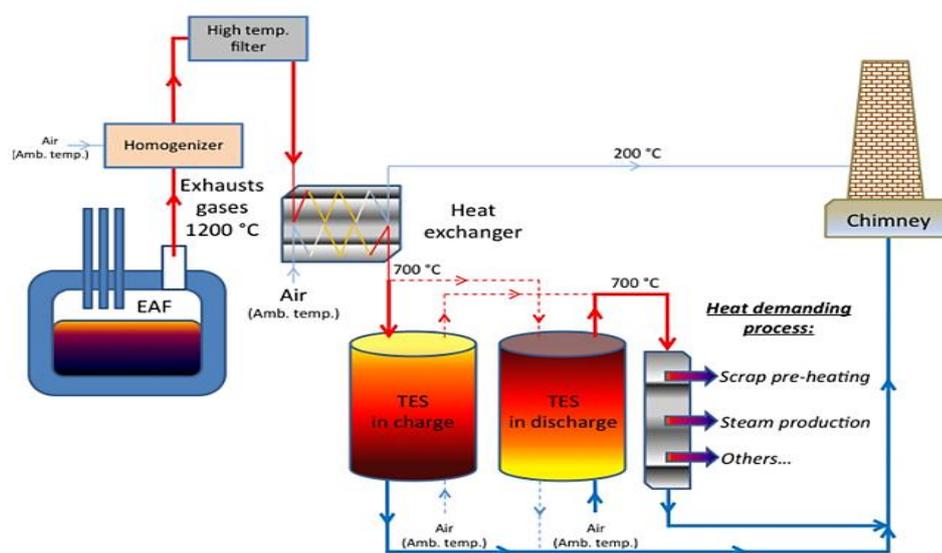


Figura 3. Esquema do Sistema de TES proposto para recuperação do calor residual em uma siderúrgica.

Fonte: Ortega; Rodríguez (2019).

Duffie et al. (2003), comentam que os sistemas TES devem ser observados a luz dos sistemas térmicos solar onde os principais componentes são: coletor solar, unidade de estocagem, aparelhos de conversão, carregadores, sistema de energia auxiliar e sistema de controle.

Eles citam também que as principais características de um sistema de armazenamento de energia (TES) são: sua capacidade por unidade de volume, faixa da temperatura de operação; os meios de carregamento e descarregamento do calor e a diferença de temperatura associada a esse processo, a estratificação da temperatura na unidade de estocagem, a energia necessária para carregar e descarregar a energia térmica, os tanques, recipientes e outros dispositivos associados ao sistema de estocagem, meios de controle de perdas térmicas e seus custos (DUFFIE et al., 2003).

Phueakphum; Fuenkajorn (2010), desenvolveram um protótipo de TES para climatização em habitações que não dispõem de energia elétrica como mostra a Figura 4. Nessa pesquisa, a energia solar térmica é utilizada para aquecer um sistema TES, que é constituído de um poço (1,75 x 1,75x 0,75m) preenchido com rochas do tipo basalto, com uma tampa de acrílico instalada na parte superior, que durante o dia, a energia térmica é armazenada no sistema TES e liberada durante a noite para climatização da habitação.

Entretanto, os resultados desse estudo indicaram que durante a noite, o sistema pode aumentar em 4°- 6 °C a temperatura interna da habitação em relação a temperatura externa.

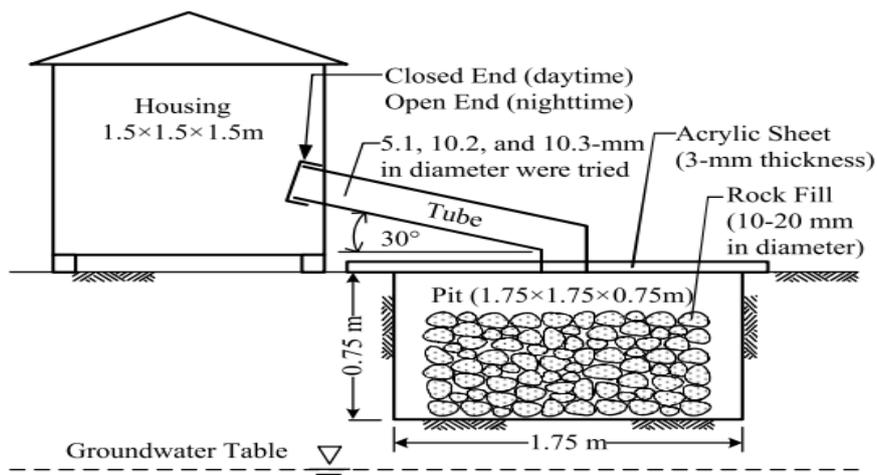


Figura 4. Esquema do leito de rocha e modelo da habitação
Fonte: Phueakphum; Fuenkajorn (2010).

Diante deste cenário, percebe-se que os sistemas de armazenamento de energia térmica podem ser incorporados em grandes fontes geradoras de calor, tais como: energia solar, energia geotérmica, usinas termoelétricas, usinas nucleares, calor residual industrial, etc., tornando-se uma das ações mitigadoras na redução da emissão de gases de efeito estufa (ZHUANG et al., 2019).

1.2.2 Classificação dos sistemas TES

Estudos e pesquisas sobre os sistemas de armazenamento de energia térmica têm se intensificado ao longo das últimas décadas, de forma que as classificações das tecnologias de armazenamento térmico são mais detalhadas para adequar eficientemente, aos variados sistemas térmicos.

Gil et al. (2010), classifica os sistemas de armazenamento de energia em três tipos: armazenamento de calor sensível; armazenamento de calor latente e armazenamento de calor químico. Alva et al. (2018), detalha a classificação dos sistemas de TES, além dos três tipos mencionados anteriormente, classifica por: frequência dos ciclos de carregamento; esquema de entrega; mecanismo de armazenamento de calor e faixa de temperatura de operação.

No armazenamento mediante calor sensível, a energia térmica é acumulada através do aumento da temperatura do meio de armazenamento, o que experimenta uma troca na sua energia interna sem que aconteça uma mudança de fase. Visto que, o armazenamento de calor sensível depende fortemente do calor específico (c_p), da massa específica do meio (ρ) e de sua condutividade térmica (k).

O fator ρc_p , chamado capacidade térmica volumétrica, determina a massa específica de energia que pode ser armazenada, e a difusividade α ($k/\rho.c_p$), determina a taxa na qual o calor pode ser liberado e extraído. No trabalho de Kuravi et al. (2013), são apresentadas uma série extensa de materiais utilizados para armazenamento do calor sensível, a lista está constituída por diversos tipos de materiais tanto sólidos, quanto líquidos, que compreendem desde rochas, concreto, ferro, sal, materiais cerâmicos e óleo sintético entre outros, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Dados publicados do potencial dos materiais de armazenamento de calor sensível.

$T_{\text{cold}} (^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{hot}} (^{\circ}\text{C})$	Material	Thermal conductivity (W/m k)	Density (kg/m ³)	Average specific heat capacity c_p (kJ/kg K)	Volumetric specific heat capacity (kWh _{th} /m ³)	Type of medium
200	300	Sand–rock–oil	1	1700	1.3	60	Solid
200	400	Reinforced concrete	1.5	2200	0.85	100	Solid
200	400	Cast iron	37	7200	0.56	160	Solid
200	500	NaCl	7	2160	0.85	150	Solid
200	700	Cast steel	40	7800	0.6	450	Solid
200	700	Silica fire bricks	1.5	1820	1	150	Solid
200	1200	Magnesia fire bricks	5	3000	1.15	600	Solid
250	350	Synthetic oil	0.11	900	2.3	57	Liquid
250	450	Nitrite salts	0.57	1825	1.5	152	Liquid
270	530	Liquid sodium	71	853	1.3	80	Liquid
300	400	Silicone oil	0.1	900	2.1	52	Liquid
180	1300	Lithium liquid salt	38.1	510	4.19		Liquid
15	400	Dowtherm A	0.1171 at 155 °C	867	2.2		Liquid
0	345	Therminol 66		750	2.1		Liquid

Fonte: Kuravi et al. (2013).

No armazenamento mediante calor latente, a energia absorvida é usada para provocar a mudança de fase do meio de estocagem. Desta forma, na mudança de fase, utiliza-se a diferença de entalpia associada, permitindo assim que o processo seja quase isotérmico, o que pode haver um aumento significativo de energia absorvida para a mesma faixa de temperatura em comparação com o calor sensível, o que constitui uma vantagem para sua integração num ciclo Rankine.

Os materiais utilizados neste modo de armazenamento são conhecidos como materiais de mudança de fase (*Phase Change Material* - PCM), os quais se fundem quando são carregados termicamente e se solidificam quando são descarregados. Assim, o calor armazenado depende não somente do calor específico, como também da diferença de entalpia da mudança de fase (KURAVI et al., 2013). Devido as altas temperaturas existentes nos sistemas de Energia Solar Concentrada (CSP), sais dos tipos inorgânicos, eutéticos e metais são comumente usados devido ao seu baixo custo econômico (LIU et al., 2016).

No armazenamento termoquímico, a energia é armazenada mediante processos de reações químicas reversíveis, ou seja, mais especificamente durante o processo de carregamento térmico, desencadeia uma reação do tipo endotérmica, capturando assim a energia do fluido de transferência, logo durante o descarregamento térmico, acontece a reação exotérmica liberando em seguida a energia. Embora este processo tenha maior potencial para armazenar energia, que mediante o calor sensível ou latente, tem sido a alternativa menos explorada (KURAVI et al., 2013).

Quanto ao mecanismo de armazenamento de energia térmica, o sistema pode ser ativo ou passivo. O sistema ativo é principalmente caracterizado pela transferência de calor por convecção forçada passando pelo material de armazenamento. Esse sistema utiliza um trabalho de bombeamento para circular o fluido de transferência de calor (HTF) durante o processo de carregamento e descarregamento.

Os sistemas ativos são subdivididos em ativos direto e ativos indireto. Se o HTF é utilizado também como meio de armazenamento, o sistema é ativo direto, enquanto em um sistema ativo indireto, um segundo meio é utilizado para armazenamento térmico. Visto que, no sistema passivo não requer trabalho de bombeamento durante o processo de carregamento e descarregamento do sistema de TES.

Esse sistema faz usos de fenômenos como inércia térmica, convecção natural, etc., para alcançar o objetivo proposto. O HTF passa através do material de armazenamento, carregando e descarregando um material sólido. Carrega energia recebida da fonte de energia térmica para o meio de armazenamento durante o carregamento, e recebe calor do meio de armazenamento enquanto descarrega. Esse sistema também é chamado de regenerador, segundo a classificação de Alva et al. (2018) (Figura 5).

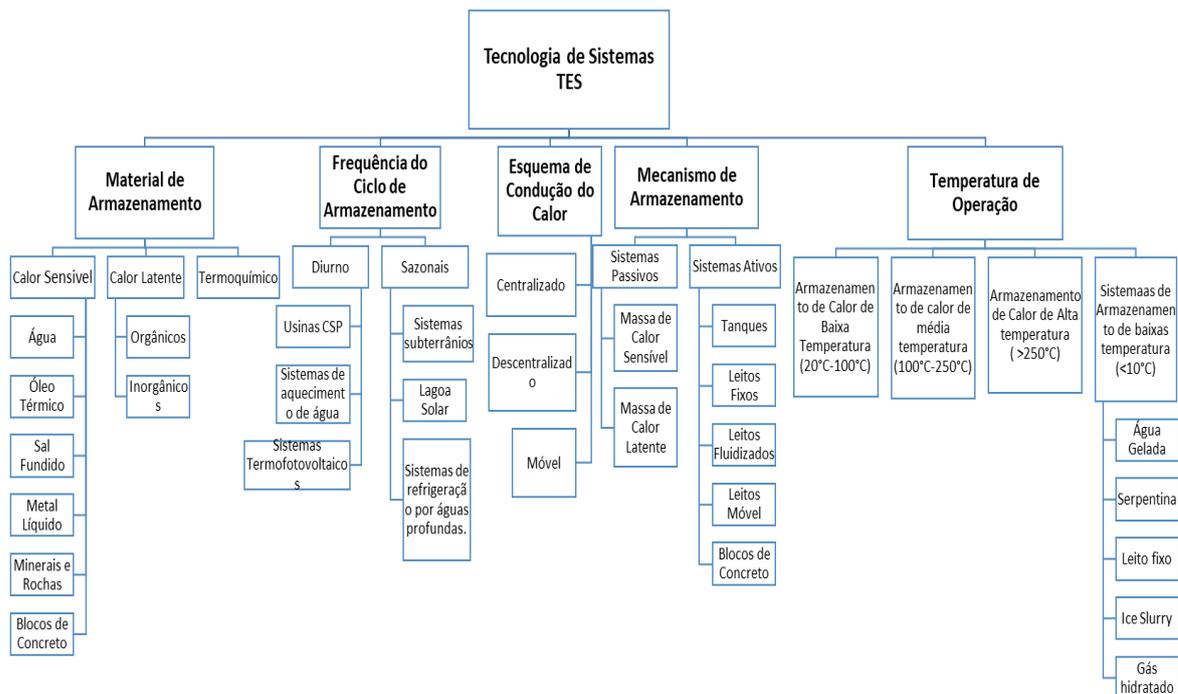


Figura 5. Sistemas de tecnologias de TES, ou sistema regenerador.

Fonte: Própria.

Pode-se observar que os sistemas TES de calor sensível, utilizam rochas como material de preenchimento; frequência do ciclo de armazenamento diurno; condução de calor centralizado, com o ar utilizando fluido de transferência de calor (HTF); sistema ativo em leito fixo e armazenamento de energia térmica de média e alta temperatura.

1.2.3. Sistemas de armazenamento em leito fixo

São sistemas que tem como forma construtiva um recipiente isolado que armazena um material de enchimento, no qual atua com o meio primário de estocagem de calor. O fluido HTF é usado para carregar e descarregar o leito por meio de transferência de calor por contato direto com a superfície do material de enchimento, sem precisar de um trocador de calor, como mostra a Figura 6.

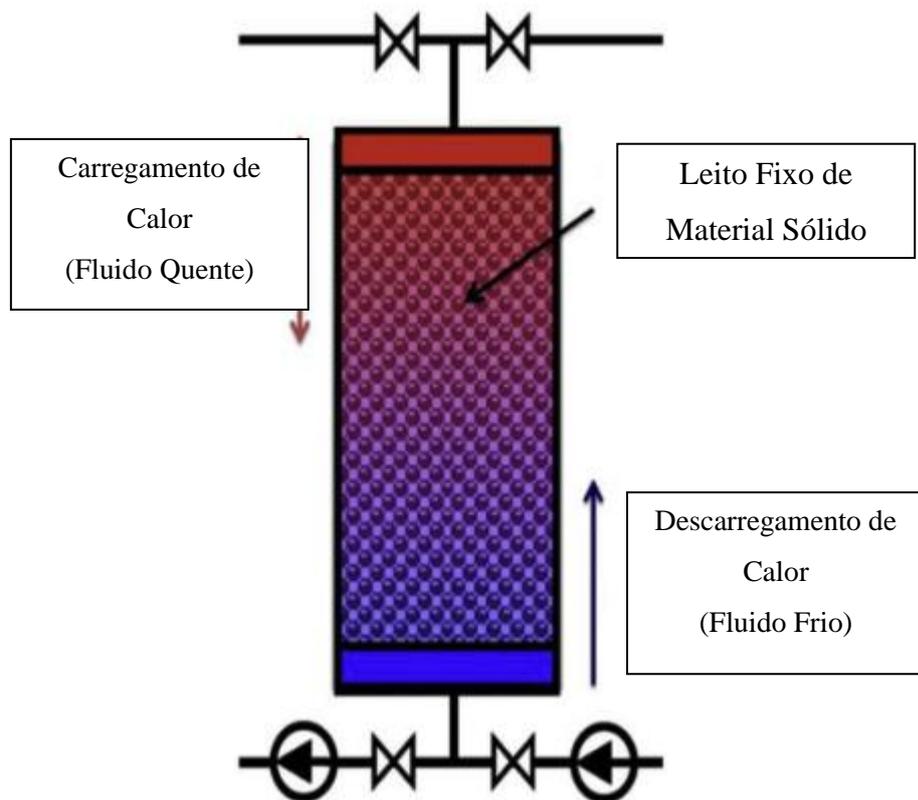


Figura 6. Sistema TES de Leito Fixo.
Fonte: Alva et al. (2018).

O contato direto propicia uma área da superfície de contato maior, melhorando a eficiência. A estratificação da temperatura é uma característica observada ao longo do leito

nos sistemas de leito fixo. Os sistemas de termoclina utiliza o líquido como HTF, preenchendo todo o leito e também armazenando uma parte da energia térmica total.

Esse sistema também pode utilizar gases como HTF, assim como o ar que atua somente como HTF. Usualmente os fluidos de transferência de calor (HTF) são: ar, água, óleo térmico e CO₂. Enquanto, os materiais de enchimento do leito são rochas, seixos, cascalhos, areias, gesso, solo, material de mudança de fase (PCM), blocos de metal, pequenos cubos e esferas de concreto, tijolos, bolas de porcelanato, bolinhas de óxido de zircônio, pedaços de minério de ferro irregulares, coque, calcário, carvão, escórias de aço, escórias de cobre, escórias de alumínio, cargas de alto-forno (SINGH et al., 2010).

A faixa de temperatura de operação da TES é limitada pela a estabilidade térmica do material de enchimento. As rochas, cascalhos e areias, são materiais muito usados na faixa de temperatura média de 50–300 °C. Nos sistemas de leito fixo, normalmente o calor é armazenado como sensível.

Porém, no caso de materiais PCM, o calor é armazenado como latente. O armazenamento de calor sensível opera com temperaturas de saída variáveis. No caso de sistemas de leito fixo, que tem o ar como HTF, as variações de temperatura do HTF localizam-se na entrada do trocador de calor, devido a temperatura ambiente, clima, etc., resultando na variação de temperatura do HTF na saída do trocador de calor.

O leito é carregado com temperaturas variadas do HTF que saí do trocador de calor. Além disso, durante o descarregamento do leito, a temperatura reduz rapidamente. Um outro problema operacional com os leitos fixos, é a flutuação térmica. Ciclos térmicos repetitivos resulta em uma expansão e contração térmica entre o material de enchimento e o material da estrutura do leito, resultando em um gradativo acúmulo de deformações plásticas, especialmente na parte inferior das paredes do leito. Segundo Singh et al. (2010), os parâmetros que influenciam os sistemas de TES de leito fixo são:

1. A vazão mássica do HTF;
2. Relação do tamanho do cascalho e o tamanho do leito;
3. Queda de pressão do HTF ao longo do leito;
4. Porosidade do leito;
5. Dimensões do leito;
6. Condutividade e difusividade térmica do material de enchimento.

Furnas (1932), provavelmente iniciou os primeiros estudos experimentais de transferência de calor de um fluido escoando através de um leito fixo contendo fragmentos sólidos, concluindo que o coeficiente de transferência de calor varia ao longo de uma linha reta com a velocidade do fluido, enquanto que a temperatura do fluido tem um efeito reduzido no coeficiente de transferência de calor e o grau de acondicionamento dos fragmentos sólidos no leito tem uma grande influência na resistência ao escoamento do fluido.

Podendo-se afirmar que houve uma considerável variação na transferência de calor para os diferentes materiais de preenchimento do leito, além de verificar que o coeficiente de transferência de calor reduziu com o aumento do tamanho dos materiais.

Colburn apud Singh (2010), utilizaram diferentes materiais granulares, bolas de vidro, bolas de porcelanato e bolas de zinco de diferentes dimensões no estudo experimental de transferência de calor através do escoamento do ar dentro de um tubo preenchido com materiais granulares. Eles apresentaram uma correlação dependente do coeficiente de transferência de calor com a vazão do ar e o tamanho dos materiais.

Coutier; Farber (1982), estudando as rochas nos sistemas TES de leito fixo, concluíram que é necessário um método geral e confiável para projetar um leito fixo; particularmente para determinar os parâmetros mais críticos como: vazão do ar por unidade de área do leito; o diâmetro das rochas; comprimento e a área da face do leito. E a vazão do ar por unidade de área do leito e o diâmetro das rochas foram utilizados para determinar o coeficiente de transferência de calor volumétrico.

Considerações para o projeto de leito foram verificadas incluindo o efeito da potência do exaustor de ar, a energia total transferida, as temperaturas atingidas e o controle de ruído. Experimentalmente foi verificado que o coeficiente convectivo de transferência de calor aumenta com o aumento da taxa de vazão e o aumento do diâmetro das rochas. Enquanto a energia utilizada pelo exaustor diminui com a redução da taxa de vazão e ocorre o aumento no diâmetro das rochas. Uma excelente aproximação foi encontrada entre as curvas experimentais e teóricas obtidas pela expressão do coeficiente convectivo de transferência de calor.

Allen et al. (2014), publicaram um artigo sobre as características, capacidade e disponibilidade de vários tipos de rocha, dolerito, gnaisse, arenito, etc., para a utilização em usinas heliotérmicas com temperatura de aproximadamente 500-600 °C. Os resultados dos

testes de cíclicos térmicos (acima de 900 ciclos em uma taxa de 2 °C/min) em várias amostras de rochas foram reportados.

O dolerito apresentou uma boa resistência aos ciclos térmicos, assim como os arenitos, mostraram ser um bom material para armazenamento de energia. O estudo apresenta também mapas geológicos que mostra a disponibilidade do dolerito na região do África do Sul, região que apresenta um grande potencial de irradiação solar. Visto que, os autores motivam o desdobramento de mais pesquisa para caracterização das rochas, principalmente os arenitos que apresentaram uma boa resistência aos ciclos térmicos (ALLEN et al., 2014).

Schlipf et al. (2015), estudaram a influência de materiais de pequena granulometria no armazenamento de energia térmica utilizando modelos teóricos e resultados experimentais. Como resultado, obtiveram materiais de pequena granulometria, com diâmetros igual ou menor do que 2 mm, alcançaram temperaturas muito acentuadas durante o carregamento do leito, e observaram que o termoclina é bastante acentuado para todas as vazões de ar consideradas.

Diago et al. (2018), coletaram amostras de areia de diferentes localizações do deserto dos Emirados Árabes para verificar o potencial desse material na utilização para o armazenamento de energia mediante calor sensível, através de medições das propriedades termofísicas e mecânicas.

Uma análise termogravimétrica verificou que a areia é termicamente estável aproximadamente entre 650 a 1000 °C, e que perdeu massa nos primeiros ciclos de aquecimento. O estudo conclui que a transformação do carbonato de cálcio em óxido de cálcio a temperatura mais elevada durante os primeiros ciclos de aquecimento, tem um impacto negativo na absorção solar da areia. Além do alto teor de cálcio conduzido na aglomeração de areia, que prejudicou a operação do sistema. Portanto, é essencial localizar pontos de coleta de areia com baixo teor de carbonato (DIAGO et al., 2018).

Trabalho realizado por Erregueragui et al. (2016), para propor um sistema de TES ecológico, verificaram que, o leito fixo tendo quartizito como material de armazenamento de energia térmica e óleo de palma como fluido de transferência de calor, foi utilizado para verificar o seu desempenho em relação aos óleos sintéticos.

O resultado mostra que a maior distribuição de temperatura no meio sólido ocorreu quando a temperatura foi superior a 500 °C, já o carregamento realizado com óleo de palma se deu quando a temperatura foi inferior a 500 °C. A quantidade de energia transportada pelo

o óleo de palma é 16% maior do que a quantidade transportada pelos óleos sintéticos na mesma temperatura, demonstrando resultados promissores e ambientalmente seguros (ERREGUERAGUI et al., 2016).

Anderson et al. (2015), apresentaram um modelo de equação térmica junto com a solução de fluxo de Navier-Stokes para calcular o perfil de temperatura transiente em um leito fixo, durante o armazenamento. O leito fixo tem α -alumina, como material de armazenamento, e o ar como fluido de transferência de calor.

O modelo prediz com sucesso o comportamento da estratificação da temperatura com o tempo. O estudo mostra também a variação das propriedades termofísicas (condutividade térmica, calor específico, massa específica e viscosidade do ar) em função da temperatura para a alumina e o ar. Os autores chamam a atenção para aqueles que usam essa abordagem devem ter cuidado de garantir que o equilíbrio térmico seja válido e o número de Biot permaneça menor que 0,1 para evitar efeitos de condução intrapartícula (ANDERSON et al., 2015).

Yin et al. (2017), baseado na teoria do equilíbrio térmico local em meios porosos, desenvolveram um modelo numérico bidimensional para investigar o armazenamento térmico e o processo de liberação de calor de uma termoclina de sal fundido e um leito fixo poroso. A validação do modelo numérico foi realizada, comparando os resultados da simulação com os resultados experimentais.

Para o levantamento dos dados os autores projetaram um sistema híbrido experimental de armazenamento térmico, composto de um tanque de estocagem de sal fundido, uma bomba, um aquecedor e um leito fixo que foi preenchido, em dois momentos, com materiais diferentes para o armazenamento térmico. No primeiro momento, com esferas de Zircônio (12mm de diâmetro), no segundo momento, foi utilizado espuma de Carboneto de Silício.

O resultado mostra que as camadas estáveis de termoclina se formam durante o armazenamento térmico e com a liberação de calor. E que a eficiência de armazenamento térmico é ligeiramente menor do que o sistema de armazenamento utilizando apenas sal fundido (YIN et al., 2017).

Diversos trabalhos são publicados sobre os sistemas de armazenamento de energia térmica em leitos fixo estudando a correlação do coeficiente convectivo de transferência de calor e o tipo de material, as dimensões do material, a vazão do ar, a porosidade do material,

a fração de vazio do leito, as dimensões do leito com intuito de alcançar o maior desempenho, confiabilidade e capacidade de armazenamento de energia do sistema TES.

Assim como as diversas pesquisas abordadas, o presente trabalho busca caracterizar novos materiais, como as rochas já existentes no Semiárido brasileiro, ou seja, o aproveitamento de um recurso para o uso em sistemas TES, onde a fonte de energia térmica é descontínua, tornando-se viável a instalação de usinas CSP, principalmente devido à grande intensidade de irradiação solar, proporcionando o incremento no valor das fontes de energia térmica contínua para o Semiárido e com alternativas sustentáveis e ecologicamente corretas.

1.2.4. Armazenamento em leito fixo de rocha

As rochas se apresentam um meio alternativo de armazenamento de energia térmica em leitos fixo. Uma das vantagens é a sua disponibilidade no meio ambiente e o baixo custo, requerendo somente o transporte para o local da instalação do sistema TES. Contudo, nem toda rocha é propícia para armazenamento em altas temperaturas, como também, pode sofrer falha estrutural e decomposição química. Um dos fatores mais importante em um leito fixo de rocha é o ciclo térmico, em uma usina termosolar que pode chegar a mais de 7000 ciclos de aquecimento e resfriamento das rochas, em um ano (ALLEN et al., 2014).

O leito fixo de rocha é constituído basicamente por um recipiente que deve ser de material de baixa condutividade térmica, ou ter um bom isolamento, como uma tela para suporte das rochas e tubulação de entrada e saída para a condução do HTF. O leito fixo não opera com temperatura constante. Durante o dia, ocorre em diferentes condições, tais como: radiação solar; temperatura ambiente; temperatura de entrada do coletor solar e as características do carregamento que resultam na variação da temperatura de saída do coletor solar.

As dimensões do sistema de armazenamento são em função dos vários parâmetros do sistema como: temperatura, material, perda de calor, custo médio de armazenamento, trocadores de calor, custo da energia auxiliar e condições de operação, tais como: isolamento, temperatura ambiente e fração solar por quantidade de calor total carregado.

O diagrama esquemático da operação do sistema de armazenamento de calor em leito de rochas é demonstrado de acordo com a Figura 7.

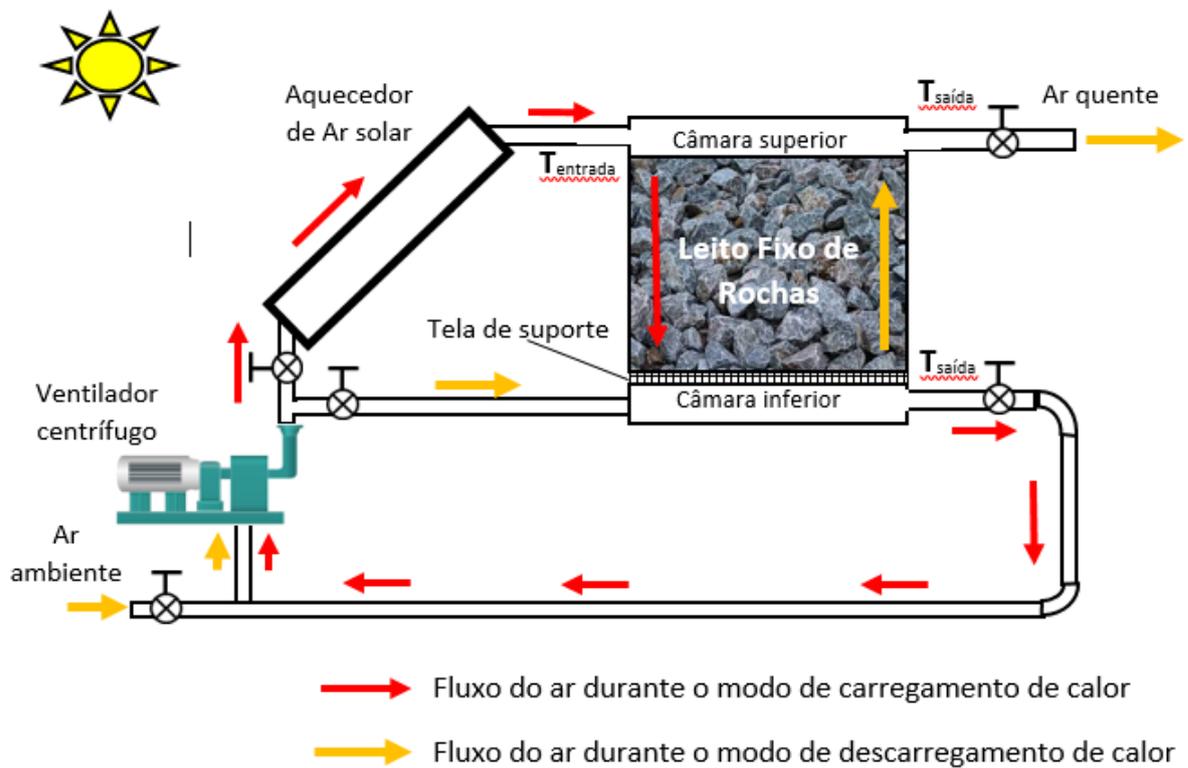


Figura 7. Esquema da operação do sistema de armazenamento de calor em leito de rochas.

Fonte: Própria.

O princípio básico de funcionamento do sistema de armazenamento de calor em leito de rochas, consiste em fornecer ou extrair energia térmica por meio do fluxo do fluido de transferência de calor (HTF), que circula através do leito de rochas, resultando no processo de carregamento e descarregamento, mudando a região de quente para fria, respectivamente. O objetivo é obter uma estratificação, isto é, manter separado a região quente e fria, por meio de uma fina camada de termoclina, tendo um alto gradiente térmico.

Devido a existência de fluido quente e frio no mesmo tanque, a condição favorável de estratificação pode ser desestabilizada devido ao efeito de flutuabilidade. Esse problema pode ser resolvido devido ao estabelecimento da direção do fluxo do fluido quente de cima para baixo durante o carregamento do leito para o fluido frio, de cima para baixo durante o descarregamento do leito.

Segundo Bruch et al. (2014), o movimento da termoclina durante o carregamento é descendente, enquanto durante o descarregamento é ascendente, e se estende marginalmente devido à mistura de fluidos, difusão térmica e troca de calor finita entre o material de preenchimento do leito e o HTF. Os diferentes estágios de estratificação são mostrados na Figura 8.

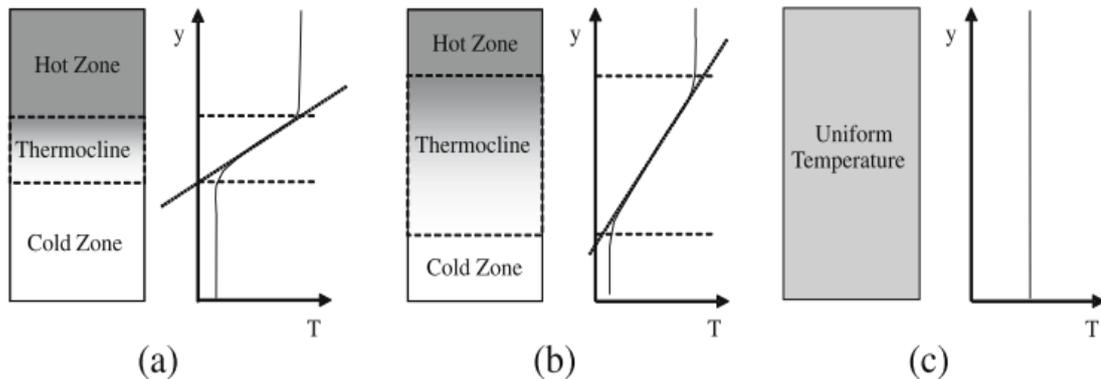


Figura 8. Três diferentes estágios de estratificação em leito fixo para a mesma quantidade de calor armazenado (a) estratificação alta (b) estratificação moderada e (c) sem estratificação.

Fonte: Haller et al. (2009).

A energia pode ser armazenada em rochas, seixos, pedregulhos e areias, e podem ser acondicionados em um reservatório com isolamento térmico. Esse tipo de sistema apresenta um projeto simples e de baixo custo, usualmente utilizado para temperaturas acima de 100 °C, com aquecedor de ar solar.

O material de armazenamento deve resistir ao aquecimento até temperatura de estocagem sem fundir, e aos ciclos térmicos de carregamento e descarregamento, não sofrem desagregação e fragmentação. Para uma temperatura de estocagem entre 500 e 600 °C, a temperatura mínima de fusão da rocha deve ser 750 °C com taxa máxima de variação de temperatura de 0.7 °C/min (ALLEN et al., 2014)

A condutividade térmica deve ser suficientemente alta para permitir a condução de calor da superfície da rocha até o seu núcleo, com um pequeno gradiente de temperatura. Isso requer que o número de Biot, pode correlacionar a condutividade térmica com o coeficiente convectivo de calor, com valor menor 0,1. O número de Biot fornece um critério único para estimar a relativa importância da resistência interna das partículas.

A condutividade térmica é uma propriedade contínua em função da propriedade da rocha, temperatura e estrutura do leito. Visto que, o conceito de condutividade térmica

específica do leito é utilizado para descrever o fenômeno de transferência de calor dentro do leito de rochas como mostra a Figura 9.

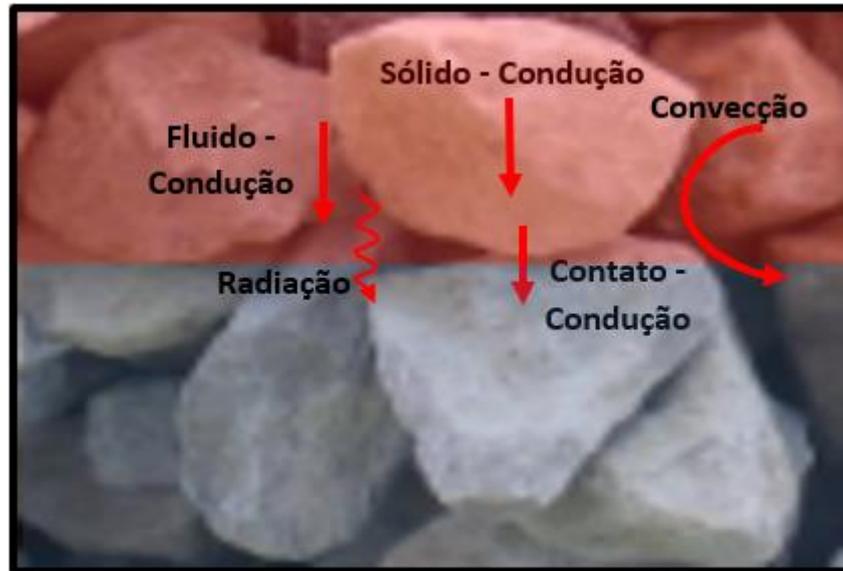


Figura 9. Fenômeno de transferência de calor dentro do leito de rochas.
Fonte: Própria.

Conforme Allen et al. (2014), para uma dada temperatura de entrada, a taxa de aquecimento e resfriamento depende das propriedades da rocha, diâmetro, massa do fluxo de ar e comprimento do leito. As rochas devem ter alta resistência térmica para não fundir quando submetidas a altas temperaturas e as suas sucessivas alterações, a alta condutividade térmica para conduzir o calor da superfície até a outra face com baixo gradiente de temperatura, a alta capacidade de calor volumétrico para armazenar grande quantidade de calor em menor espaço, e a alta resistência à compressão para que as rochas que ficam na parte inferior do leito não sofram fragmentação.

O sistema de armazenamento de calor em leito de rocha, pode ser utilizado em ampla faixa de temperatura, em aplicações de baixa temperatura, como o aquecimento de ambientes, aquecimento de água, secagem de grãos e também para alta temperatura, acima de 500 °C, como o fornecimento de gases quente para a usina termossolar.

1.2.5. Rochas

A litosfera, é uma camada superficial e sólida da Terra, composta por rochas, que, por sua vez, são formadas pela união natural entre diferentes minerais. Assim, em razão do caráter dinâmico da superfície, através de processos como o tectonismo, o intemperismo, a

erosão e muitos outros, existem uma infinidade de tipos de rochas. Os três principais tipos são classificados como: ígneas, metamórficas e sedimentares. A Figura 10, apresenta o ciclo das rochas e a descrição do tempo geológico entre os três principais tipos de rochas.

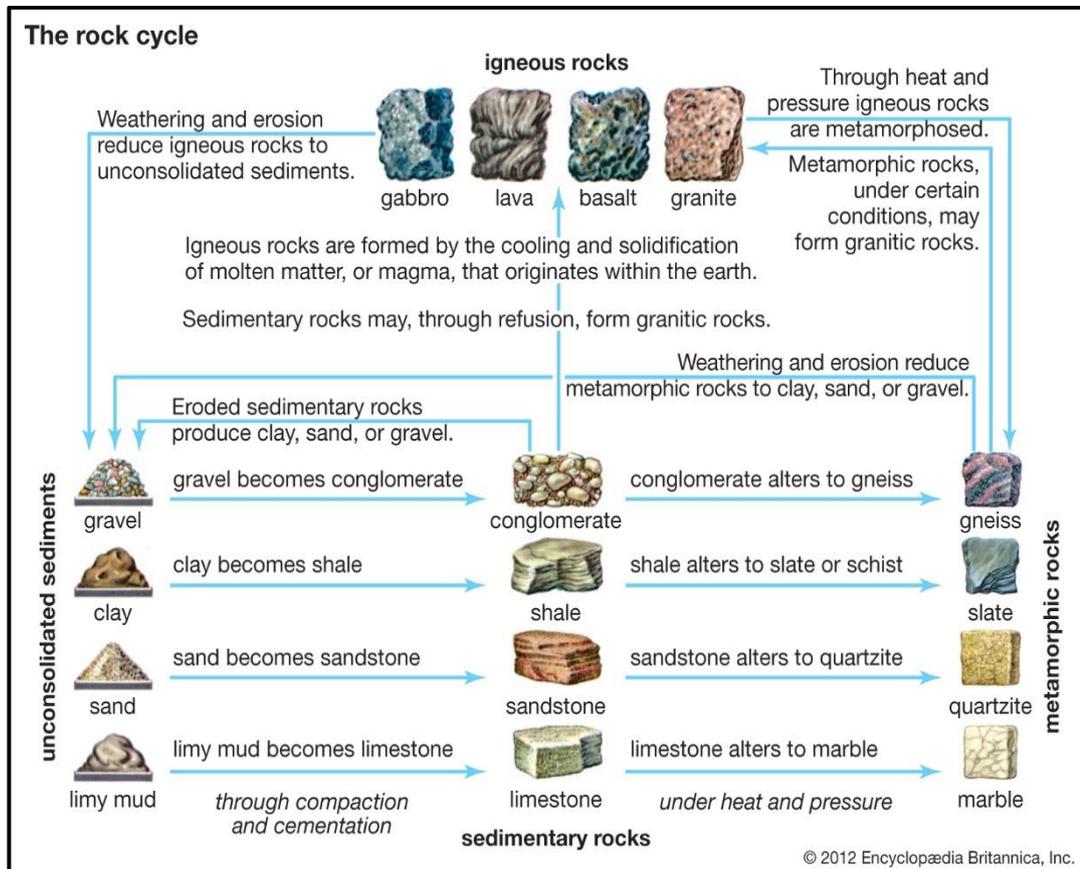


Figura 10. Ciclo das Rochas. Rochas ígneas, metamórficas, sedimentares e sedimentos não consolidados.

Fonte: Encyclopedia (2019).

Uma breve descrição de cada tipo de rocha será abordada nos subitens 2.2.1 – 2.2.3, com ênfase nos aspectos de formação e propriedades que influenciam na aptidão das mesmas e na aplicação de armazenamento de energia térmica.

1.2.6. Rochas ígneas

As rochas ígneas são formadas através do resultado da solidificação do magma (massa de rocha em fusão total ou parcial existente debaixo da superfície da terra). Enquanto ocorre o resfriamento do magma, os íons durante a fusão se organizam em padrões ordenados, e os cristais crescem, até que todo o líquido seja solidificado em cristais

entrelaçados (cristalização). A cristalização não ocorre de uma única vez nos materiais fundidos, pois diferentes minerais têm diferentes temperatura de cristalização.

Os dois principais tipos de rochas ígneas são distinguidos pelo o processo de formação: rocha intrusiva ou plutônica, que sofre cristalização abaixo da superfície da terra, em condições de altas temperaturas e pressões, e a rocha extrusiva ou vulcânica que sofre solidificação na superfície da terra. Vale salientar que, as rochas plutônicas e vulcânica podem ter mineralogia semelhantes, mas são texturalmente distintas.

As rochas plutônicas, como exemplo o granito, tende a originar grãos minerais de tamanho grandes e textura mais grosseira, resultado do resfriamento lento do magma. As rochas vulcânicas, assim como as lavas basálticas, têm grãos finos e textura vítrea, ou seja, que não apresenta cristais, resultado do rápido resfriamento do magma.

Texturas porfiríticas descrevem as rochas com minerais maiores em uma matriz mais fina, na qual os grãos maiores são originados da cristalização de um magma em profundidade que posteriormente subiu para níveis de crosta e estão localizados em camadas mais superficiais, ressaltando que o resfriamento rápido pode conduzir para texturas amorfas, não cristalina e vítrea.

O granito é uma rocha plutônica mais generalizada e bastante conhecida, formada por uma parte substancial da crosta continental. São geralmente rochas de granulação grossa e uniforme, constituído por quartzo, feldspato e mica. Grandes rochas plutônicas podem ser envolvidas por rochas metamórfica com formato menor do que a rocha ígnea, por exemplo, dolerito, que geralmente têm um grão mais fino e apresenta a forma de diques, podendo variar de alguns centímetros até vários metros de espessura (ENCYCLOPEDIA, 2019).

A rocha vulcânica resulta do magna que atingiu a superfície da terra para formar fluxo de larva, erupções ricas em gás ou vulcões. A rocha mais comum e que cobre 70% da superfície terrestre, é o basalto. É importante ressaltar que as rochas basálticas provenientes da crosta continental ascenderam através de sistemas de fraturas (diques) do manto. Os gases dissolvidos nas larvas podem exsolver após a cristalização, deixando para trás pequenos vazios (vesículas) cheios de minerais que resultam em texturas porosas (SINGH et al., 2010).

Todas as rochas ígneas são cristalizadas a partir das rochas fundidas, e a temperatura de fusão varia consideravelmente de acordo com o tipo da rocha. A fusão ocorre em temperaturas acima de 750 °C. Granitos são formados através da fusão parcial das rochas crostais a temperaturas abaixo de 750 °C, enquanto as rochas basálticas necessitam de temperaturas acima de 1000 °C para que ocorra a fundição. O magma basáltico atinge uma

temperatura no estado líquido em torno de 1500 °C e no estado sólido, próximo de 800 °C, abaixo desta última temperatura, todos os minerais são cristalizados (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 2020).

As rochas ígneas ou magmáticas são classificadas de acordo com: a porcentagem de sílica, a cor dos minerais, o tipo de feldspato e a granulação. Quanto a porcentagem de sílica as rochas ígneas podem ser: ácidas ($\text{SiO}_2 \geq 65\%$), neutras ($52\% \leq \text{SiO}_2 < 65\%$) e básicas ($\text{SiO}_2 < 52\%$). Conforme a cor dos minerais as rochas ígneas podem ser félsicos, coloração clara e máficos, que apresentam coloração escura.

Considerando a predominância de feldspato potássico e alcalinos na formação da rocha ígneas, são classificadas como alcalinas (predominância do feldspato potássico). A Monzoníticas, equilíbrio entre o feldspato alcalino e álcali-cálcicas e Plagioclásticas, menor predominância do feldspato alcalino. No entanto, se a classificação for pela granulação das rochas ígneas, elas podem ser: grossas, minerais com granulação maior do que 5 mm; médias, minerais com granulação entre 1 mm e 5 mm; e finas com granulação menor do que 1 mm, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Classificação das rochas ígneas quanto ao tipo de rocha, percentual de SiO_2 , granulação e cor.

% SiO_2	Rochas	Granulação	Cor
Ácidas	Pegmatito	Muito grossa	Clara
	Granito	Grossa e Média	Tons de cinza-róseo
	Granodiorito	Média e Fina	Cinza
	Aplito	Fina	Cinza-claro e róseo
Neutras	Nefelina-Sienito	Grossa e Média	Tons de cinza
	Fonólito	Média e Fina	Verde-escuro e preto
Básicas	Gabro	Grossa	Preto, Cinza e Esverdeado
	Diabásio	Média e Fina	Preta
	Basalto maciço	Fina	Preta, cinza e esverdeado
	Basalto vesicular	Fina	Marron

Fonte: Própria.

1.2.7. Rochas metamórficas

As rochas metamórficas são formadas por rochas ígneas e sedimentares que sofreram mudanças mineralógicas de textura devido ao aumento de pressão, temperatura e deformação na crosta da Terra. Existem diferentes graus de metamorfismo, variando do baixo grau, com leve mudança mineralógica e de textura, até alto grau de metamorfismo, com mudanças consideráveis na textura e na composição mineralógica. O calor é o principal fator no processo de metamorfismo, visto que, o aumento da temperatura propicia a recristalização e a formação de novos minerais, uma vez que a maior parte das reações metamórficas ocorrem no estado sólido (ENCYCLOPEDIA, 2019).

Os dois principais grupos de rochas metamórficas são: rochas metamórficas de contato ou termal e rochas metamórficas regional ou dinamotermal. As rochas metamórficas são encontradas em contato e na zona marginal das rochas plutônicas intrusivas, por exemplo: as rochas cornianas ou *hornfels*. Hornfels é uma rocha dura de granulação muito fina composta de grãos minerais estreitamente interligados.

As rochas metamórficas regional são rochas muito mais comuns do que as de contato. A deformação e as tensões diretas conduzem para a recristalização dos minerais na direção preferida. Neste caso, as rochas adquirem texturas foliadas (em camadas) e (ou) lineares (esticadas), levando ao desenvolvimento de fortes anisotropias mecânicas na rocha.

Essa textura tem influência considerável no comportamento mecânico e na capacidade da rocha apresentar trinca ou quebra ao longo da direção preferida de formação da recristalização. Exemplo de rochas metamórficas regional foliadas, que consegue cobrir grandes áreas, são as gnaisses e xisto, comumente associadas como rochas ígneas, assim como o granito. O mármore e o quartzito também são rochas metamórficas regional, mas são tipicamente não foliadas.

A mudança de textura e mineralógica durante o metamorfismo depende da composição da rocha original e das condições de pressão e temperatura. Uma rocha rica em mineral argiloso, como o xisto, sofrerá metamorfismo para uma ardósia em condições de baixo grau de metamorfismo. Com o aumento da pressão e temperatura, a ardósia será eventualmente transformada em gnaisses, em alto grau de metamorfismo. Com a exceção da perda de água, o processo de metamorfismo é, em muitos casos, determinado pelo rearranjo dos minerais em diferentes estruturas cristalinas. Minerais formado em alto grau de

metamorfismo tipicamente apresenta estruturas cristalina mais compacta e alta massa específica.

Grieve apud Allen et al. (2014), afirmaram que o metamorfismo em rochas sedimentares melhora a dureza, durabilidade e a resistência das rochas, enquanto que as rochas ígneas sofrem metamorfismo e não apresentam essas propriedades de forma acentuada. Rochas *hornfel* e quartizito são formadas por uma combinação de alta temperatura e pressão e possuem alta resistência e boa rigidez.

1.2.8. Rochas sedimentares

As rochas sedimentares ocupam 5% da crosta terrestre, mas cobre cerca de 66% da superfície terrestre. Esse fato evidencia que a origem das rochas sedimentares se deu através do intemperismo e da deposição. Existem dois grandes grupos de rochas sedimentares: quimiogênicas e clásticas. O calcário, o giz e o gesso são rochas sedimentares quimiogênicas. Essas rochas se formam devido a precipitação de minerais solúveis na solução.

O carbonato de cálcio e magnésio são os principais minerais precipitados para formar o calcário e a dolomita, o sulfato de cálcio, forma o gesso, o cloreto de sódio e potássio formam a halita (sal de rocha). Sílica, ferro e óxido de magnésio podem ser dissolvidos em grandes quantidades para formar o Cherte, que são rochas siliciosa inteiramente composta de quartzo criptocristalino, compostas por rochas sedimentares mais duras.

As rochas clásticas são formadas através do intemperismo e erosão de rochas já existentes. Essas podem ser rochas ígneas, metamórficas e sedimentares pré-existentes. As rochas ígneas e metamórficas são mais propensas ao intemperismo e a erosão do que as sedimentares pré-existentes, uma vez que a estabilidade desses minerais em condições próximas à superfície é limitada.

O transporte do material de erosão, a deposição e a compactação ou cementação e componentes minerais conduzem para a formação das rochas sedimentares clásticas. Arenito, xisto e conglomerados são exemplos comuns desta formação. As rochas quimiogênicas contém alguns detritos como componente, e a maioria das rochas clásticas são cimentadas pela precipitação química originalmente dissolvida na água (ENCYCLOPEDIA, 2019), como mostra a Figura 11.

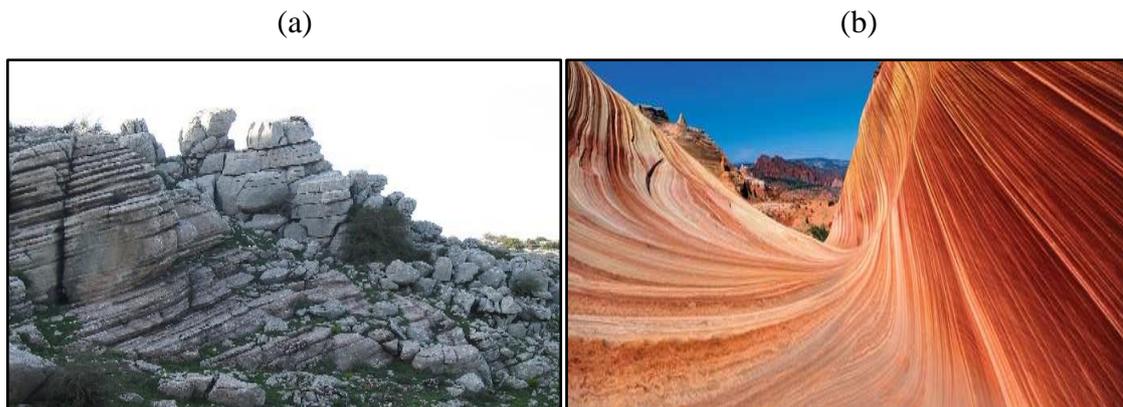


Figura 11. Formações calcárias no Torcal de Antequera, na Espanha (a) e formações de arenito no Arizona, no EUA (b).

Fonte: Wikipédia (2006).

1.2.9. Geologia do Semiárido brasileiro

Segundo o Ministério de Integração Nacional (2018), o Semiárido brasileiro abrange nove estados, dos quais oito pertencem a região Nordeste do Brasil, ocupando uma área total de 1,03 milhão de Km² (12% da área do País). Atualmente congrega uma população de 27 milhões de pessoas (12% da população brasileira) vivendo em 1.262 municípios. A Figura 12 representa as delimitações do Semiárido brasileiro conforme Resolução n°107 de 27 de julho de 2017 do conselho deliberativo da SUDENE (Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste).



Figura 12 Figura 12: Delimitações do Semiárido do Brasil.

Fonte: Portal Brasil. Adaptado do LAPIS (LAPIS - Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite).

A região do Semiárido é caracterizada por um clima com grande variabilidade pluviométrica, onde a intensidade é menor do que a taxa de evaporação. Em algumas regiões, como os sertões da Paraíba, Bahia e Pernambuco, a seca pode durar de 9 a 10 meses. Além do clima seco, essa região é caracterizada por apresentar grande potencial de radiação solar, com média anual entre 5,43 e 5,50 kWh/m² dia e irradiação direta normal de 6,5 kWh/m².

1.2.10. Recursos geológicos

O mapa geológico, obtido do Atlas Nacional Digital do Brasil do IBGE, no modo interativo, mostra a formação geológica em toda a região do Semiárido do Brasil. Rochas do tipo granito, gnaiss, arenitos e formações de sedimentos, que dá origem a vários tipos de areias, são predominantes na região do Semiárido.

Correia et al. (2011), em estudo publicado sobre a região semiárida brasileira, caracterizam a formação geológica do Semiárido brasileiro. E revelam que devido à resistência a erosão dos xistos e outras rochas de baixo grau do metamorfismo, a região

caracteriza-se por relevo plano e ondulados, com vales muito abertos, apresentando rochas graníticas, gnássica e outra com alto grau de metamorfismo.

E revelam a presença de encostas onde a formação geológica parece ser mais rica em quartzo e quartizito. Conforme o Correia et al. (2011), os tipos de rochas predominantes na região Semiárido são: granitos, xistos, gnaisses e migmatitos, o que pode ser confirmado no mapa (Figura 13).



Legenda	
Litologia	
	Delimitação do semiárido do Brasil.
	Predomínio de granitos, granitoides e/ ou gnaisses orto e paraderivados, contendo ou não rochas máficas e/ ou ultramáficas metamorfisadas, metassedimentos migmatitos.
	Sequências metassedimentares e meta-vulcanossedimentares de grau metamórfico baixo –fraco a média
	Predomínio de granitos, granitoides e/ ou gnaisses orto e paraderivados, contendo ou não rochas máficas e/ ou ultramáficas metamorfisadas, metassedimentos migmatitos.
	Sedimentos psamíticos, pelíticos e rudáceos.
	Sedimentos psamíticos a pelíticos-carbonáticos com anquimetamorfisico a fraco grau metamórfico.
	Sedimentos halocênicos relativos a aluviões atuais e terraços mais antigos.
	Metassedimentos psamíticos a pelíticos-carbonáticos de grau metamórfico baixo a fraco.

Figura 13. Mapa geológico do Semiárido do Brasil.
Fonte: Própria.

A disponibilidade das rochas possibilita o estudo da caracterização para o uso em sistema de TES de calor sensível em leito fixo de rocha. E viabiliza a condutividade,

difusividade, e o calor específico das rochas disponíveis na região do Semiárido, possibilitando a seleção de pedra idôneas para uso em sistemas TES. A amostra utilizada neste trabalho foi coletada da região do Semiárido brasileiro, na cidade de Petrolina (PE) na forma de agregado de origem artificial, denominada de brita.

1.2.11. Modelos preditivos da condutividade térmica em meios porosos

Vários modelos de predição para o cálculo da condutividade térmica da partícula sólida em leitos porosos e fluidos estagnados foram desenvolvidos, favorecendo tecnologias nos sistemas de armazenamento de energia térmica em leitos fixos. A condutividade térmica do gás, a porosidade do leito e a geometria do grão são parâmetros importantes no uso destes modelos.

Totsas; Martin (1987), realizaram um levantamento sobre diversos estudos envolvendo a avaliação da condutividade térmica dos leitos com fluido estagnado. E verificaram que o levantamento expõe métodos de estimação experimental para regimes estacionário e transiente utilizando a técnica do fio-quente, como o de medidas axiais e radiais, o absoluto e o comparativo.

Também são apresentados modelos preditivos para a determinação e conhecimento das propriedades térmicas de meios porosos. Visto que, essas combinações com os modelos preditivos permitem o cálculo respectivamente da condutividade térmica do leito poroso e da partícula sólida.

Os aprofundamentos dos estudos acerca da condutividade térmica efetivam em leitos com fluidos estagnados, levaram ao surgimento dos modelos preditivos, desenvolvidos, primeiramente por Kunii; Smith (1960), seguidos por Zehner; Schlunder (1970), posteriormente aperfeiçoado por Bauer; Schlünder (1978). Estes modelos basearam-se na condutividade térmica do fluido e das fases sólidas, além da porosidade, da temperatura média do grão e do diâmetro das partículas sólidas.

Os modelos de Kunii; Smith (1960) e Bauer; Schlunder (1970), consideram células elementares unitárias compostas por duas partículas em contato, cujos centros estão sobre uma mesma linha de fluxo de calor, sendo o primeiro modelo aplicado somente a partículas esféricas e o segundo, as partículas de geometria qualquer.

Vários trabalhos demonstram a eficiência dos modelos preditivos KS e BS quando comparados com os resultados experimentais. Sahnoune; Grenier (1988), mediram a condutividade térmica da zeólita NaX usando o modelo Kunii e Smith (KS) em um leito na presença de diferentes gases, obtendo bons resultados com o modelo. A condutividade térmica efetiva do grão de zeólita NaX variou muito pouco com a quantidade de água, mas observou-se uma grande variação com a pressão no domínio de 1 a 4 bar.

O estudo também mostra que a condutividade térmica do grão é muito sensível à pressão, pois observou-se uma variação de faixa entre 1000 a 2000 mbar, o que sugere que a baixa pressão e a condutividade térmica do grão é limitada, principalmente pelas resistências de contato entre os grãos, e não pela condutividade.

Gurgel et al. (2001), pesquisando sobre a difusividade térmica e a cinética de adsorção da sílica-gel/água, encontraram resultados obtidos através do cálculo da condutividade térmica do grão de sílica-gel a partir dos dois modelos Kunii; Smith (1960) e Bauer; Schlunder (1978). Os autores utilizaram os procedimentos de medição da condutividade térmica do leito e aplicação dos modelos preditivos no cálculo da condutividade térmica do grão de sílica-gel.

Observando diferenças entre os valores obtidos com cada modelo, visto que o valor do modelo BS foi superior ao encontrado no modelo KS. A partir dessa conclusão, foi possível definir um valor médio dos valores obtidos, como exemplo, o valor da condutividade térmica efetiva do grão. O modelo de BS mostrou uma maior eficiência em relação ao modelo KS, pois leva em conta efeitos de forma, arranjos não monodispersados, oxidação das partes metálicas, radiação e efeitos de baixa pressão (BAUER; SCHLUNDER, 1978).

Gupta et al. (2002), utilizaram o modelo BS para calcular a condutividade térmica efetiva do leito polidisperso, e assim conseguiram demonstrar que a condutividade térmica efetiva em um leito de partículas com distribuição de tamanho disperso e de forma irregulares podem ser simuladas para alguma composição sem ser necessário medir a porosidade no local.

Zhang; Wang (2017), em seus estudos, revisaram a condutividade térmica do solo e modelos preditivos, indicando que o conteúdo de água e o quartzo tem efeito considerável na condutividade térmica do solo. Os autores citam que os fatores que influenciaram na composição da condutividade térmica do solo incluem componentes minerais, tamanho de partículas, forma e gradação.

A fase sólida do solo pode conter diferentes minerais, como o quartzo, a caulinita, o ilite, etc, e é cercada por fluido de poro (isto é, água e ar). O conteúdo de quartzo tem efeito sobre a condutividade térmica da fase sólida, uma vez que possui a maior condutividade entre todos os minerais do solo (cerca de 7,9 W/mK). Os autores concluíram que o efeito do conteúdo de quartzo na condutividade térmica do solo deve ser considerado um fator que merece atenção na previsão do modelo para aplicações geotérmicas (ZHANG; WANG, 2017).

Gonzo (2002), avaliando as correlações para a condutividade térmica efetiva de materiais granulares na forma esférica, com base na solução de Maxwell para a condutividade térmica de dispersões diluídas de esferas e a forma melhorada da equação de Maxwell desenvolvida por Chiew; Glandt, concluíram que as duas correlações gerais para a estimativa de condutividade efetiva do leito fixo são eficientes.

Os meios porosos com média massa específica (porosidade entre 0,15 a 0,85) e outros com alta massa específica (porosidade maior do que 0,9), foram alvo do estudo, utilizando modelo simplificado, não considerando os efeitos da variação de pressão no leito, na radiação, no arranjo polidisperso e no efeito da forma da partícula sólida, servindo assim, para correlacionar com modelos mais flexíveis e abrangentes como o modelo BS.

Devido ao exposto anteriormente e à geometria irregular que se constitui a brita a ser analisada nesta dissertação, optou-se por definir o modelo de Bauer; Schlunder (1978), como o modelo aplicável para a determinação da condutividade térmica do grão.

Gurgel et al. (2001), demonstraram que o modelo produziu resultados bastante satisfatórios quando comparado com o modelo de Kunii; Smith (1960). Tsotsas; Martin (1987), concluíram nos seus estudos sobre condutividade térmica em leito fixo, que o modelo BS é um modelo abrangente, flexível, de cálculos técnicos preciso e apresenta uma boa concordância com os dados experimentais.

1.3. MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1 Descrição do equipamento

O equipamento construído para a determinação experimental da condutividade e difusividade térmica dos materiais, feito através de adaptações do modelo proposto por Pereira et al. (1991) (Figura 14).

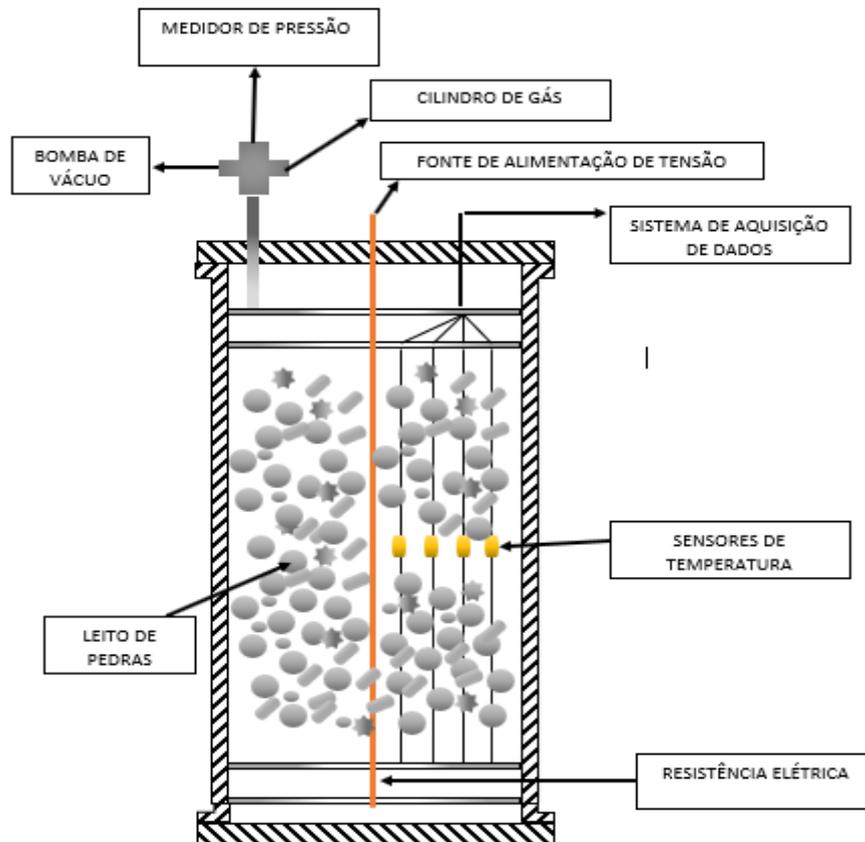


Figura 14. Corte transversal do equipamento construído.

Fonte: Própria.

O aparelho de medição mostrado na Figura 14 é estruturado por um tubo de ferro fundido de 102 mm de diâmetro interno, 350 mm de altura e espessura da parede medindo 2 mm. Na parte superior do tubo existe um flange com 12 furos roscados concêntricos (rosca 1/4") com alojamento para anel O'ring de 3 mm de espessura (com o objetivo de melhorar a estanqueidade). Na parte inferior existe uma tampa cega diretamente soldada no tubo.

O tubo é fechado na parte superior por uma tampa com 12 furos roscados concêntricos (rosca 1/4") e três saídas roscadas: alimentação de gases ou desgaseificação a vácuo; mensuração da pressão interna do aparelho e o sistema de passagem de ligação dos sensores de temperatura (PT100) e da resistência de NiCr. Internamente ao tubo foi instalado

o leito granular da amostra. O leito foi delimitado por dois discos de aço inox com diâmetro de 100 mm, espaçado entre si por três varões roscados com porcas nas extremidades, que permite a variação da altura do leito até 300 mm (Figura 14).

Ao longo da direção longitudinal do leito granular foi colocada uma resistência elétrica de NiCr de 0,198 mm de diâmetro externo, fixada em seu eixo geométrico, conectada a uma fonte de alimentação de tensão que permitiu a variação da corrente e da tensão em até 2 A e 24 V, respectivamente, podendo gerar diferentes fluxos de calor uniforme no eixo de simetria da amostra. Quatro sensores PT 100 Ω ou termoresistências de platina com 2,0 mm de diâmetro externo e 10 mm de comprimento, apresentando uma precisão absoluta de $\pm 0,3$ K foram dispostos radialmente no plano central transversal da amostra, a uma distância de 10 mm uma da outra (Figura 14).

Os sensores foram fixados nos fios de aço inox de 0,1 mm de diâmetro externo, tensionados por meio de um esticador composto de dois discos de aço inox com 100 mm de diâmetro e instalados nos varões roscados na parte superior e inferior do leito granular da amostra, como pode ser verificado na Figura 15.

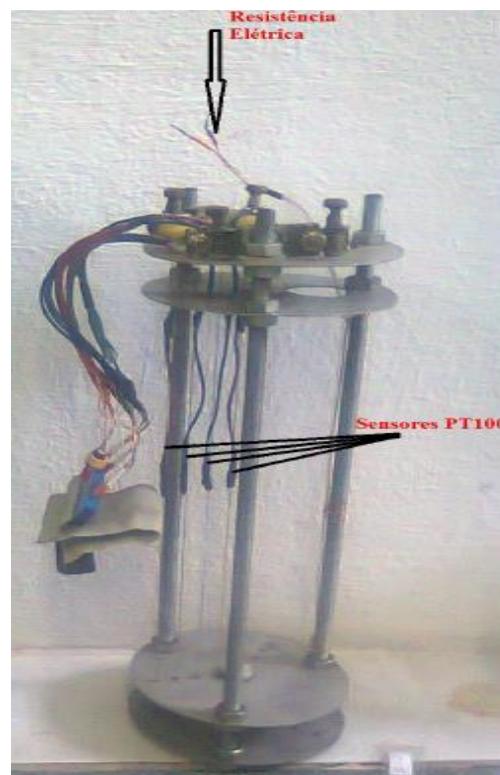


Figura 15. Imagem do dispositivo do leito granular
Fonte: Própria.

A rocha foi colocada dentro do leito granular, sem que houvesse compactação, a uma altura de 250 mm, o que permitiu tornar desprezível os efeitos bidimensionais no campo de temperatura no plano central da amostra (PEREIRA et al., 1991).

As temperaturas da amostra do material mineral analisado foram registradas com uso dos sensores PT100, e tiveram os terminais conectados a um sistema de aquisição de dados SPIDER8 da marca Hottinger Baldwin Messtechnik (HBM) que enviaram os sinais referentes a cada termoresistência para o notebook, onde os dados registrados foram armazenados com o auxílio do Software Catman® Professional.

Os equipamentos utilizados para a determinação da condutividade térmica e difusividade térmica do leito de britas estão descritos na Figura 16.

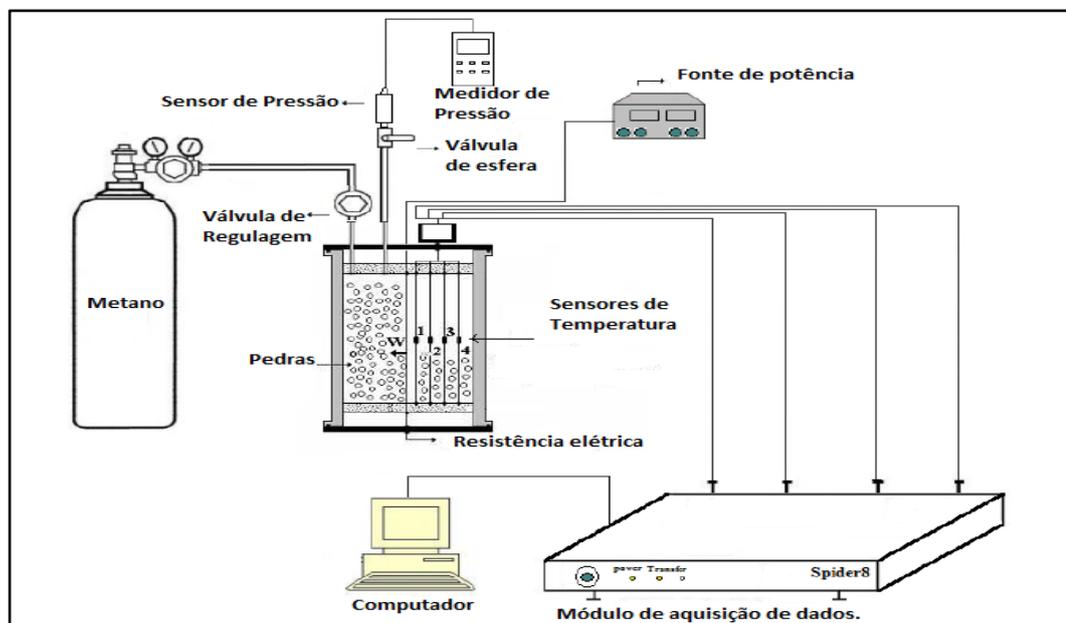


Figura 16. Os equipamentos utilizados para a determinação da condutividade térmica e difusividade térmica do leito de britas.

Fonte: Própria.

1.3.2 Material mineral

O material mineral utilizado para caracterização térmica foi um agregado bastante utilizado na construção civil denominado brita, cuja composição granulométrica foi entre 19 mm e 25 mm, classificado como a Brita n° 01, segundo a Norma NBR 7111 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O aspecto visual do agregado graúdo da amostra de Brita n° 01, foi codificada como AB-01 (Figura 17).



Figura 17. Aspecto visual da amostra de Brita, AB-01.
Fonte: Própria.

A caracterização química da amostra AB-01 obtida por fluorescência de raio X (FRX) foi mostrada na Tabela 3. E o espectro de difração do raio X da amostra AB-01 foi verificado na Figura 18.

Na composição química observa-se a predominância majoritária de sílica, metais e álcalis, enquanto na difração de raio X, verificou-se a preeminência de quartzo, caracterizando a rocha de origem AB-01 como Quartzito.

Tabela 3. Composição química da amostra AB-01 e suas frações.

Óxidos presentes (%)										
Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	K ₂ O	BaO	Na ₂ O	Outros
AB-01	97,6406	0,4875	0,9675	0,2960	0,1405	0,1302	0,0380	0,1138	0,0759	0,1100

Fonte: Laboratório de Engenharia Civil da UFPB.

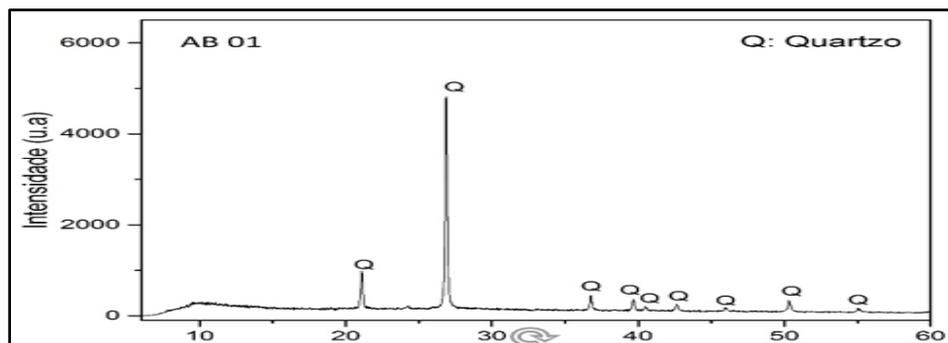


Figura 18. Espectro de difração de raios X do agregado AB-01.

Fonte: Laboratório de Engenharia Civil da UFPB

A microscopia da seção polida da AB-01 pode ser visualizada na Figura 19, onde verificou-se a presença de defeitos, como poros e trincas internamente ao agregado.

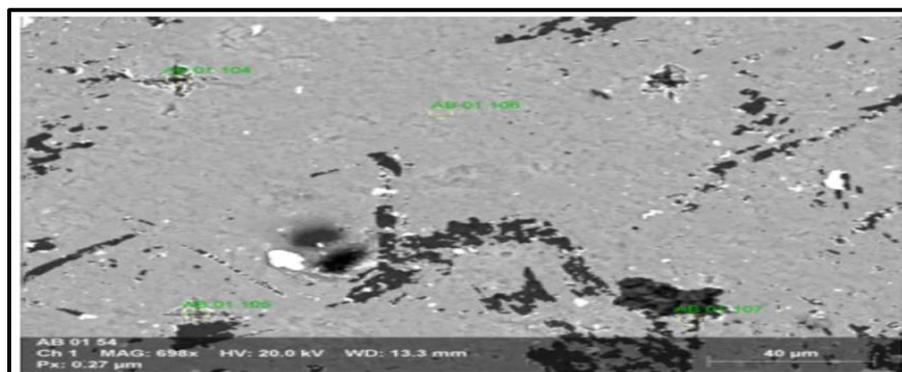


Figura 19. Microscopia Eletrônica de Varredura da seção polida do agregado AB-01

Fonte: Laboratório de Engenharia Civil da UFPB.

1.3.3. Medida da porosidade do leito de brita

A porosidade do leito fixo de brita foi medida utilizando-se um Becker com volume de 1000 mL. Inicialmente foi coletado de forma aleatória a amostra de brita. Em seguida, acondicionada no Becker ocupando o volume existente e verificando-se vazios entre os grãos de brita. Na colocação de brita no Becker, buscou-se a compactação natural do leito, sendo este procedimento realizado de maneira semelhante ao do leito fixo de brita no reator utilizados nos experimentos.

A porosidade do leito representa o percentual da fração de espaços vazios existentes em relação ao volume total ocupado pela amostra. Portanto, a porosidade neste caso pode ser representada pela razão entre o volume vazio e o volume total.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{vazio}}}{V_{\text{total}}} \quad (1)$$

onde:

ε = porosidade;

V vazio, é o Volume de vazio (mL);

V total, é o Volume total do leito fixo (mL).

Para medir o volume existente entre os grãos de brita no leito, optou-se inicialmente por adição de água, com auxílio de uma bureta graduada de 1000 mL foi inserida dentro do Becker, e preenchida com brita, acompanhando o seu comportamento no preenchimento dos vazios existentes. Quando a quantidade de água adicionada atingiu a parte superior do Becker o volume dos vazios dos leitos foi totalmente preenchido.

Em seguida, foi registrado o volume de água, retirando-se da bureta graduada de 1000 mL, e determinado assim, o valor do volume de água que preencheu os espaços vazios entre as partículas. O procedimento foi repetido 8 vezes, e calculado a porosidade média do leito, $\bar{\varepsilon}_b$, a através da equação (1).

Foi considerando o efeito da variação exponencial da porosidade próximo a parede do leito fixo, onde a porosidade decresceu de forma exponencial em relação à distância normal da parede do leito, obtendo-se o valor um ($\varepsilon=1$) na vizinhança da parede e infinito (ε_∞), no centro do leito (MARCONDES, 2001). Para determinar a porosidade leito, foi utilizada a equação (2) proposta por Chandrasekhara; Vortmeyer, (1979).

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty \left(1 + C_1 e^{\left(\frac{-N_1 w}{d_p} \right)} \right) \quad (2)$$

Na equação, C_1 e N_1 são constantes empíricas que possuem valor de 1, 4 e 5 respectivamente (HSU; CHENG, 1988). O valor de w representa diferença entre o raio do leito, r_b e a coordenada radial, $r(w)$, $w = r_b - r(w)$; e d_p , é o tamanho da partícula, isto é, o diâmetro equivalente de uma esfera de igual volume. O valor de ε_∞ é obtido pela interação que ajusta a curva da porosidade em função da distância, $\varepsilon(w)$, para o valor de um, na parede do leito.

Para um melhor entendimento foi feito o esquema apresentado na Figura 20. Esquema da região do leito com porosidade variável; a) seção longitudinal do leito e b) seção transversal do leito. Onde foi o leito foi dividido em dois cilindros, um na parte da parede do leito, com diâmetro D_b , e outro na parte do centro, com diâmetro D_c . Os cilindros estão distanciados pelo tamanho da partícula d_p .

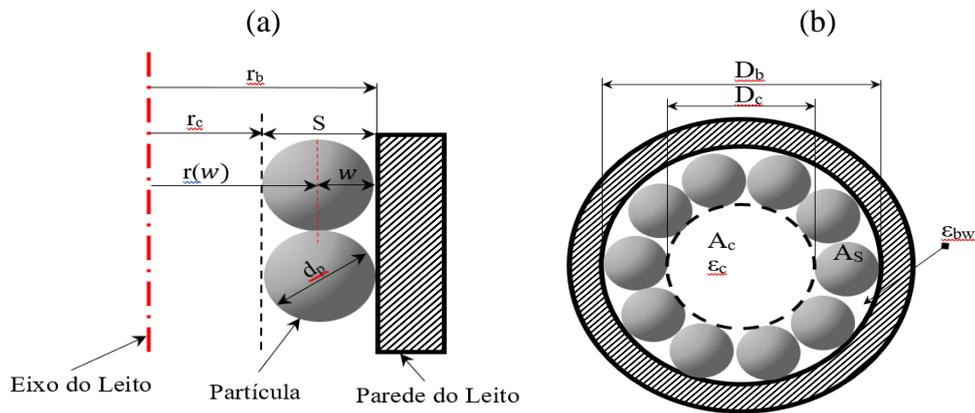


Figura 20. Esquema da região do leito com porosidade variável; a) seção longitudinal do leito e b) seção transversal do leito.

Fonte: Própria.

Por meio de integração numérica, utilizou-se a regra do trapézio, e determinou-se a porosidade média, considerando-se o efeito da variação exponencial da porosidade próximo as paredes do leito, $\bar{\epsilon}_{bw}$.

$$\bar{\epsilon}_{bw} = \frac{1}{(w_2 - w_1)} \int_{w_1}^{w_2} \epsilon \, dr \quad (3)$$

Os limites de integração são os valores que delimitam o espaço de espessura S , sendo zero em $r(w) = r_b$ e S em $r(w) = r_c$, onde r_c é o raio do cilindro da parte central.

A porosidade do leito de brita foi obtida pela porosidade no centro do leito, ϵ_c , que é a média ponderada das porosidades $\bar{\epsilon}_b$ e $\bar{\epsilon}_{bw}$, obtida pela equação:

$$\bar{\epsilon}_b \cdot A_t = \epsilon_c \cdot A_c + \bar{\epsilon}_{bw} \cdot A_s \quad (4)$$

onde,

A_t , é a área transversal base do leito (m^2);

A_c , é a área do cilindro da parte central (m^2);

A_s , é a área anular com porosidade variável, $A_s = A_t - A_c$ (m^2).

A média ponderada das porosidades mais o erro foi utilizada para a identificação da porosidade, de acordo com o modelo proposto por Bauer; Schlunder (1978).

1.3.4. Determinação da massa específica do leito

A massa específica média do leito de brita ($\bar{\rho}_b$) foi determinada utilizando-se uma balança eletrônica e um Becker de 1000 mL. Inicialmente, de forma aleatória, foi escolhida uma amostra de brita. Em seguida, a massa de brita foi acondicionada no Becker, pesada na balança eletrônica, registrado o valor e posteriormente, calculada a massa específica, utilizando-se a equação (5). Esse procedimento foi repetido 12 vezes. Em seguida, foi calculada a média através dos valores encontrados.

$$\rho = \frac{M_{amostra}}{V_{bureta}} \quad (5)$$

onde:

$M_{amostra}$ é a Massa da amostra (Kg);

V_{bureta} é o Volume da bureta (m^3).

O efeito da variação da porosidade próximo a parede do leito provocou mudanças consideráveis na massa específica do leito, admitindo-se que seja considerada a massa específica na parte central do leito como a massa específica do leito de brita, ρ_b .

A massa específica da parte central foi determinada pela equação (6),

$$\rho_c = \bar{\rho}_b \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon_c}{1 - \bar{\varepsilon}_b} \right) \quad (6)$$

onde:

ρ_c , é a massa específica na parte central do leito [kg/m^3];

$\bar{\rho}_b$, é a massa específica média do leito de brita [kg/m^3];

1.3.5. Determinação da condutividade térmica do leito: regime estacionário

As medidas experimentais da condutividade térmica do leito de brita foram realizadas em regime permanente baseando-se nas técnicas propostas por Tsotsas; Martin (1987) e seguindo o princípio do método dos cilindros concêntricos descrito por Pereira et al. (1991).

A potência elétrica constante foi dissipada por um fluxo de calor “Q” em direção do eixo das amostras, enquanto as medições de temperatura no leito foram tomadas. A amostra foi acondicionada no leito fixo a uma altura de 250 mm, desta forma, garantiu que a relação altura e diâmetro (102 mm) fosse superior a 2,3 mm, permitindo que as perdas térmicas axiais fossem desprezíveis, considerando-se apenas a transferência de calor unidirecional ao longo do raio “r” (SAHNOUNE; GRENIER, 1988).

As temperaturas no interior do leito situadas nas posições radiais r_i , $T(r_i, t)$, foram monitoradas através do sistema de aquisição de dados até atingir o regime estacionário, a condutividade térmica do leito foi determinada diretamente através da equação (7) onde “w” é a potência dissipada no centro da amostra no interior do aparelho de teste, “L”, a altura do leito de brita e a declinação da curva de temperatura em função do logaritmo natural da distância r de cada ponto no aparelho de medição ao eixo central.

A condutividade do leito (k_b) foi obtida através do gráfico temperatura (T) versus o logaritmo da posição do sensor $\ln(r_i)$ no leito, pela equação de condução de calor unidimensional de Fourier, equação (7)

$$k_b = \frac{w}{2\pi L dT/d(\ln r)} \quad (7)$$

onde,

k_b é a condutividade térmica do leito (W/mK);

w é a potência dissipada (W);

L é o comprimento axial da amostra (m); e,

$dT/d(\ln r)$ é o declive na linha de temperatura;

Os resultados experimentais foram obtidos através do método de medição estacionário, onde foi permitido a determinação da condutividade térmica efetiva do leito fixo de brita na presença de ar, do gás hélio e do gás metano sob pressão constante.

A princípio foi realizado a medição da condutividade térmica do leito de brita sob ar na pressão atmosférica, com intuito de aferir as posições das sondas dentro do leito e diminuir os erros sistemáticos de posicionamento. Os dispositivos e equipamentos utilizados foram testados e aferidos para a obtenção dos resultados com um mínimo de erro possível. O método utilizado foi empregado em diversos trabalhos anteriores sendo obtido resultados satisfatórios como em Pereira et al. (1991); Gurgel (1996).

Os subitens a seguir tem como objetivo apresentar as aferições realizadas e as estimativas de erro do método experimental.

1.3.6. Aferição do sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado nos experimentos foi testado inicialmente com uma tensão de 2,0 V, sendo o sinal medido para cada canal da placa de aquisição de dados.

1.3.7. Aferição das sondas

As sondas de platina (Pt 100 Ω) utilizadas na aquisição das temperaturas ao longo do raio do reator, foram inicialmente aferidas utilizando-se o sistema de aquisição de dados. Cada sonda foi conectada a um canal da placa de aquisição, realizando-se a verificação da temperatura em ambiente com temperatura controlada.

Isto se faz necessário devido à sensibilidade das sondas com relação à variação de temperatura. A dispersão garantida pelo fabricante para as sondas foi de 0,3 K. Através da aferição foi possível eliminar os efeitos da dispersão no qual correspondeu a mínima variação da resistência elétrica na fabricação dos sensores.

1.3.8. Resistência usada no centro do reator

Foi utilizada uma resistência de Ni-Cr de 0,25 m de comprimento e 0,1 mm de diâmetro externo e 10 Ω de resistência. A resistência foi montada no centro do dispositivo do leito granular entre os dois discos que limitam a armação. Nas bases superior e inferior

da resistência foi usado TEFLON como isolante, evitando que o calor fosse transmitido da resistência para os discos limitantes da armação cilíndrica.

1.3.9. Aferição dos posicionamentos das sondas

As sondas para aquisição dos dados foram montadas no dispositivo do leito granular. Cada sonda ficou disposta ao longo do raio do leito e fixada com uso de uma fita adesiva entre dois fios de aço inox fixos nas extremidades dos dois discos que limitavam a altura do leito, estando estes fios distendidos e paralelos entre si.

A disposição de cada sonda no dispositivo do leito granular foi determinada no projeto do leito fixo conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Disposição das sondas no leito fixo.

Sonda (PT100Ω)	Raio projetado da sonda ao centro do leito (mm)	Raio medido da sonda ao centro do leito após montagem (mm)
1	10	12
2	20	19,8
3	30	32,5
4	40	39,6

Fonte: Própria.

A disposição de cada sonda conforme os distanciamentos de projeto sofre modificações que são causadas pela montagem das mesmas no dispositivo do leito granular. Portanto, entre duas sondas de temperaturas, é acrescido um erro de posicionamento causado pela montagem destas nos fios paralelos de sustentação e da fita adesiva.

Após a montagem da resistência central e das sondas no dispositivo do leito granular, foram realizadas as medidas das distâncias das sondas até o centro. As novas posições, encontravam-se dispostas na Tabela 4, onde foram utilizadas as sondas no leito fixo como referência para as medições, no entanto, estas foram corrigidas pois pode haver alteração de posicionamento após a colocação da amostra de brita no interior do leito.

Realizada a montagem do dispositivo do leito granular e interligando à placa de aquisição de dados, foram iniciadas as medições. A princípio testaram-se a resistência

elétrica no centro do leito fixo, dissipando uma potência de 10 W e verificando-se o comportamento das sondas Pt 100 Ω. Em seguida, o leito foi preenchido com brita (2,42 kg) e iniciou-se a medição da condutividade térmica efetiva do leito fixo de brita e ar, em regime estacionário à pressão atmosférica.

Foram realizadas cinco experiências com a mesma amostra variando-se a potência dissipada em 2,5 W, começando de 5 W até 15 W, através de uma fonte externa de alimentação de corrente contínua. Os dados foram coletados através da placa de aquisição e armazenados no microcomputador.

Após o estabelecimento do regime estacionário para cada potência, realizou-se o cálculo da condutividade térmica obtida através das retas de regressão linear, para os posicionamentos estimados das sondas de temperatura. Com os dados obtidos das temperaturas medidas para cada ponto, encontrou-se o posicionamento real de cada sonda, corrigindo-se o posicionamento através de regressão linear pela equação (8):

$$T_i = A \ln r_i + B \quad (8)$$

Os valores encontrados permitiram a correção de posicionamento para cada experimento realizado, aferindo-se a posição de cada sonda para a potência correspondente ao experimento. Ao final, o posicionamento aferido foi determinado pelas médias das medidas encontradas para cada experiência, conforme a Tabela 5.

Observou-se um desvio padrão mínimo para os resultados dos cinco experimentos realizados, o que confere uma satisfatória aferição do posicionamento das sondas. Como pode ser verificado nos resultados expostos na Tabela 5. O maior desvio foi verificado para as sondas situadas na proximidade da parede externa do cilindro, o que pode ser explicado pela interferência de mais de um fator de imprecisão das variações da temperatura e do ar.

Tabela 5. Aferição do posicionamento das sondas dentro do leito fixo.

	R1(mm)	R2(mm)	R3(mm)	R4(mm)
Posicionamento estimado (mm)	12	19,8	32,5	39,6
Posicionamento (Aferição)	R1(mm)	R2(mm)	R3(mm)	R4(mm)
Potência (W)				

5	11,611	20,933	32,576	38,598
7,5	11,572	21,107	32,302	38,740
10	11,542	21,231	32,144	38,800
12,5	11,568	21,182	32,051	38,955
15	11,569	21,198	31,945	39,051
Média	11,573	21,130	32,204	38,829
Desvio Padrão	0,025	0,119	0,246	0,179

Fonte: Própria.

1.3.10. Estimativas de erro do método estacionário

A precisão absoluta para o valor medido da condutividade térmica do leito granular k_b depende das incertezas referentes a precisão das sondas de temperatura, dos respectivos posicionamentos que foram inferiores a 1% (PEREIRA et al., 1991), do conhecimento do erro e do valor da razão da potência dissipada pela altura do leito granular, que é de ordem de 2%. Somando a isso as perturbações do campo bidimensional de temperatura, as variações da temperatura ambiente e as inerentes ao sistema de aquisição de dados e sensores, estimou-se que o erro total foi inferior a 10% (GURGEL: KLUPPEL, 1996).

1.3.11. Determinação da condutividade térmica da partícula sólida

Os modelos matemáticos preditivos apresentados por Kunii; Smith (1960) e Bauer; Schlunder (1978), são os mais difundidos para o cálculo da condutividade térmica efetiva em leitos contendo fluidos com ausência de escoamento.

Conforme exposto em diversos trabalhos apresentados, o modelo mais indicado para investigação da condutividade térmica em um leito compostos por grãos de forma irregular, é o modelo de Bauer; Schlunder (1978), o qual se adequa na aplicação ao leito constituído por grãos de brita na presença de gás e com ausência de escoamento. O modelo tem apresentando bons resultados experimentais, confirmados por numerosos dados disponíveis sobre o cálculo da condutividade térmica efetiva de diversos leitos porosos contendo fluido estagnado existente na literatura especializada.

Pelas razões expostas, o modelo de Bauer; Schlunder (BS) foi usado para a determinação da condutividade térmica efetiva dos grãos do leito composto por britas, sendo

o modelo função da condutividade do leito (determinada experimentalmente), da condutividade do fluido, da porosidade do leito, da temperatura, da dimensões dos grãos, da distribuição do tamanho dos grãos, da região de contato entre as partículas sólidas e da radiação.

A seguir, o modelo BS será descrito, apresentando-se seus princípios, os quais incluem os mecanismos de transferência de calor por condução e radiação nas fases sólida e fluida, além de parâmetros aos quais estes mecanismos são dependentes.

1.3.12. Modelo Bauer-Schlünder

O modelo parte da idealização de uma célula unitária, como mostrado na Figura 21, onde duas partículas em contato estão sobre a mesma linha de fluxo de calor, que passa pelo centro das duas partículas. O modelo considera que o fluxo de calor seja constante e paralelo ao gradiente médio de temperatura, o que conduz a um esquema série-paralelo, em que uma parte da fase gasosa está conectada em paralelo com a fase sólida e a outra parte da fase gasosa em série. No caso de existir um fluxo considerável que passar pelo contato sólido-sólido, através da superfície de achatamento das partículas, pode-se adicionar ao esquema uma fase sólida em paralelo.

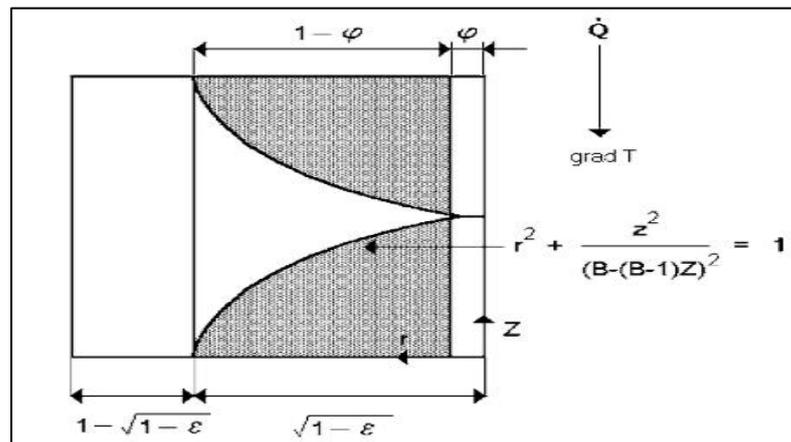


Figura 21. Célula unitária do modelo Bauer-Schlünder.
Fonte: Gurgel et al. (2001)

Com o objetivo de explicar a relação de limitação do modelo como a difusão versus porosidade do leito (TSOTSAS; MARTIN, 1987), o modelo BS propõe que a fração da fase gasosa, que ocorre em paralelo, seja igual a :

$$S_1 = 1 - (1 - \varepsilon)^{1/2} \quad (9)$$

ε , é a porosidade dos grãos que compõem a célula elementar unitária.

A fração restante em paralelo com o volume da superfície relativa é dado por:

$$S_2 = (1 - \varepsilon)^{1/2} \quad (10)$$

Nessa fração o fluxo de calor é dividido em duas partes, uma é a fase sólida mais o gás intersticial, e a outra é o contato sólido-sólido, pela superfície relativa ϕ (também chamado de coeficiente de achatamento) entre as partículas.

Para obter um modelo válido para grãos de qualquer formato geométrico do modelo BS, assume que a interface de gás sólido é uma superfície de revolução em torno de um eixo paralelo ao gradiente térmico médio (eixo z) dada pela equação:

$$r^2 + z^2 / \{B - (B-1)z^2\}^2 = 1 \quad (11)$$

Na equação (11), o parâmetro “B”, fator de deformação, é dependente do fator de forma “C”, e do valor “ ζ ” que é a dispersão granulométrica, além da porosidade “ ε ” do leito.

O fator de deformação pode ser usado como um parâmetro de ajuste para descrever a transferência de calor em leitos de partículas não esféricas, pois possui dependência com a forma das partículas em contato.

Para superfícies de contato com a geometria esférica “B” assume o valor unitário, para superfícies de forma achatada B, apresenta valores maior que 1 ($B > 1$) e para superfícies com pontos de contato pontiagudo B, apresenta valores menores que 1 ($B < 1$); conforme ilustrado nas figuras 22, 23 e 24.

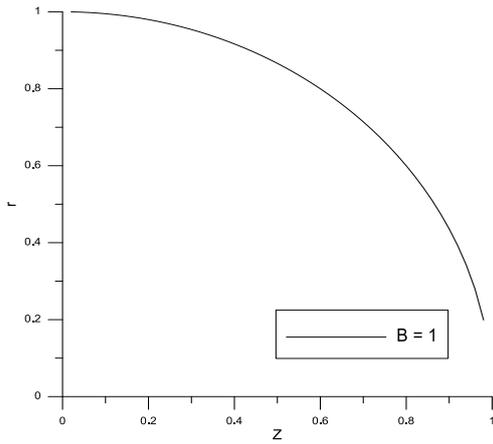


Figura 22. Relação z versus r, para fator de deformação B = 1. **Fonte:** Própria.

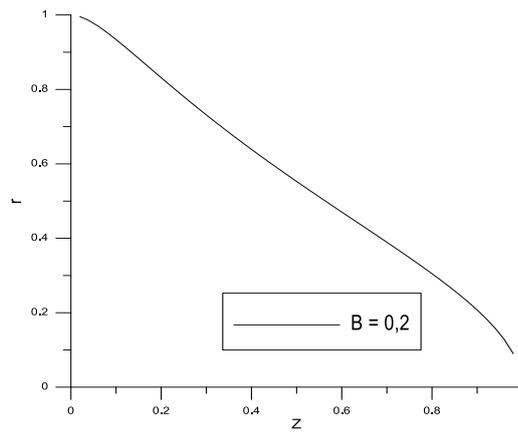


Figura 23. Relação z versus r, para fator de deformação B = 0,2. **Fonte:** Própria.

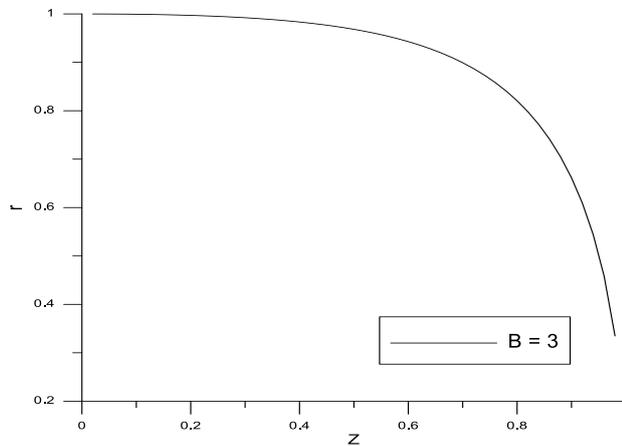


Figura 24. Relação z versus r, para fator de deformação B = 3. **Fonte:** Própria.

A dependência funcional entre o fator de deformação B e a porosidade do leito, define um limite para o ajuste arbitrário e fornece um meio de conectar essa quantidade implícita com uma propriedade macroscópica do leito facilmente mensurável.

$$B = C \left[\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right]^{\frac{10}{9}} (1 + 3\xi) \quad (12)$$

Os valores do fator de forma “C” e da dispersão granulométrica “ζ” devem ser determinados experimentalmente, sendo encontrado por Bauer; Schlünder (1978), os valores de C = 1,4 para partículas granulares quebradas e ζ = 0 para uma distribuição uniforme dos grãos no leito. Segundo Totsas e Martin (1987), o valor de ζ = 0 pode ser estendido para o

caso de distribuição bi dispersa, conforme resultados experimentais obtidos e validados na literatura.

O modelo BS considera a transferência de calor através da radiação, que em geral, depende do grau de temperatura T das propriedades ópticas da superfície da partícula sólida, das propriedades da fase contínua, assim como o comprimento do passo entre superfícies sólidas sucessivas. Uma boa aproximação para esse último, é considerar o diâmetro da partícula. A condutividade equivalente da radiação (k_r), para um pequeno gradiente de temperatura, é dada pela equação:

$$k_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T^3 \cdot D}{\left(\frac{2}{e} - 1\right)} \quad (13)$$

Onde:

D, é a dimensão característica da partícula, que para uma esfera é igual ao seu diâmetro, e para o caso de partículas quebradas, igual ao diâmetro de uma esfera de mesmo volume para determinada distribuição de partículas quebradas.

σ , é a constante de Stefan-Boltzmann;

e , corresponde à emissividade média da partícula sobre o espectro do corpo negro à temperatura T. Para rochas a emissividade possui o valor de 0,88-0,95 (INCROPERA et al., 2015).

O modelo BS consegue descrever corretamente o efeito da radiação com as formas das partículas, como pode ser verificado na equação (13).

Quando se está a baixa pressão, as transferências de calor pelo gás podem ocorrer a distâncias inferiores ao caminho livre médio das moléculas “ δ ” (condutividade de Knudsen do gás). Neste caso, a condutividade aparente k_g^* do gás é dada por:

$$\frac{k_g}{k_g^*} = 1 + \frac{2 \cdot \delta \cdot g}{D} \quad (14)$$

k_g , é a condutividade térmica do gás.

O coeficiente “ g ” é dado segundo Kennard (1938) por:

$$g = \frac{(2 - \gamma)(9a - 5)}{2\gamma(a + 1)} \quad (15)$$

Onde “ γ ” é o coeficiente de acomodação do gás, que depende da massa molar do gás, da temperatura e estrutura superficial da partícula sólida e “ a ” que é a razão entre os calores específicos do gás C_p/C_v . O coeficiente de acomodação mede a eficácia de transferência de energia durante a colisão de uma molécula de gás com a superfície da partícula.

O modelo BS adota uma expressão diferente descrita por Kennard (1938), o modelo propõe para o cálculo de “ g ” a seguinte expressão:

$$g = \frac{(2 - \gamma)}{\gamma} \quad (16)$$

A fração “ φ ”, chamado de coeficiente de achatamento, que se refere às transferências térmicas através dos contatos sólidos é dada pela seguinte equação:

$$\varphi = \frac{23\rho_k^2}{\left(1 + 22\rho_k^{\frac{4}{3}}\right)} \quad (17)$$

Sendo, ρ_k^2 a razão entre a área de contato da partícula e a área projetada da partícula ao longo do fluxo. Esse parâmetro é determinado pelo melhor ajuste com os dados experimentais do leito a baixas pressões.

Esse parâmetro possui uma complexidade para a sua determinação, devido ao fato de que o contato entre as partículas na região achatamento não é ideal, pois, depende do carregamento aplicado sob a partícula sólida e das propriedades da superfície da partícula. A abordagem empírica do modelo BS, utilizando ρ_k^2 como parâmetro de ajuste, tem se mostrado justificável para a maioria dos casos de interesse prático (TSOTSAS; MARTIN, 1987).

A equação completa do modelo de Bauer e Schlunder para o cálculo da condutividade térmica efetiva do leito fixo pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{k_b}{k_g} = (1 - \sqrt{1 - \varepsilon}) \left[\frac{\varepsilon}{\left(\varepsilon - 1 + \frac{k_g}{k_g^*}\right)} + \varepsilon \frac{k_r}{k_g} \right] + \sqrt{1 - \varepsilon} \left[\varphi \frac{k_s}{k_g} + (1 - \varphi) \frac{k_{so}}{k_g} \right] \quad (18)$$

A equação geral corresponde à soma de duas partes, uma das quais corresponde ao fluxo por condução de gás e por radiação na fase gasosa e a outra à soma do fluxo por contatos sólidos e ao fluxo que flui em série entre as partículas e o menisco gasoso que as separam. A condutividade k_{so} correspondente a este último fluxo é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{k_{so}}{k_g} = \frac{2}{Z_B} \left[\frac{B \left(\frac{k_s}{k_g} + \frac{k_r}{k_g} - 1 \right) \frac{k_g}{k_g^*}}{Z_b^2 \frac{k_s}{k_g}} \cdot \ln \frac{\left(\frac{k_s}{k_g} + \frac{k_r}{k_g} \right) \frac{k_g}{k_g^*}}{B \left\{ 1 + \left(\frac{k_g}{k_g^*} - 1 \right) \cdot \left(\frac{k_s}{k_g} + \frac{k_r}{k_g} \right) \right\}} - \frac{B - 1}{Z_B} \cdot \frac{k_g}{k_g^*} \right. \\ \left. + \frac{B + 1}{2B} \left\{ \frac{k_r}{k_g} \cdot \frac{k_g}{k_g^*} - B \left(1 + \left(\frac{k_g}{k_g^*} - 1 \right) \frac{k_r}{k_g} \right) \right\} \right] \quad (19) \end{aligned}$$

Onde,

$$Z_B = \left[1 + \left(\frac{\frac{k_r}{k_g} - B}{\frac{k_g}{k_g^*}} \right) / \frac{\frac{k_s}{k_g}}{\frac{k_g}{k_g^*}} - B \left(\frac{k_g}{k_g^*} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{k_r}{k_g} / \frac{k_s}{k_g} \right) \right] \quad (20)$$

1.3.13. Mensuração da condutividade térmica residual

Quando o leito está exposto a baixas pressões, a parcela de transferência de calor na fase gasosa é tão pequena a ponto de se tornar desprezível, então a condutividade térmica remanescente (residual) é provocada pela radiação térmica e o contato direto sólido-sólido (TSOTSAS; MARTIN, 1987). O modelo BS é muito sensível a baixas pressões permitindo identificar a área da superfície de contato (ρ_k^2) e verificar a influência do coeficiente de acomodação na condutividade térmica do leito.

O levantamento experimental realizado nessas condições permite a obtenção de dados que possibilita o estudo de sensibilidade do modelo BS as pressões reduzidas,

permitindo a verificação da influência na condutividade térmica do leito dos parâmetros secundários, identificados pelo modelo BS e sensíveis a baixa pressão.

Inicialmente é montada a linha de vácuo composta da bomba de vácuo, válvulas, mangueiras e conexões. Em seguida, a bomba de vácuo é posta em funcionamento, realizando um vácuo na ordem de 0,0056 kPa. A variação de pressão interna do reator foi monitorada e registrada até o regime estacionário ser obtido, por meio de um sensor de vácuo.

Para provocar desprendimento de possíveis gases intergranular, foi precedido uma degaseificação do leito à uma potência de 15 W durante 24 horas, sob pressão reduzida de 0,0056 kPa. Posteriormente, a potência dissipada no leito de brita foi regulada para 3 W e o perfil de temperatura foi obtido por meio do sistema de aquisição de dados.

Foi feita a regressão linear, o gráfico $\ln(r)$ versus T (K), que possibilitou a determinação da declividade da reta, e que quando aplicada na equação (7), forneceu o valor direto da condutividade efetiva do leito no vácuo.

A pressão interna do leito foi variada de 0,0056 kPa a 100 kPa e, para cada pressão, após o regime estacionário alcançado, foi mensurada a condutividade térmica efetiva do leito, k_b .

Os resultados obtidos foram utilizados para o estudo de sensibilidade do modelo BS, a pressão reduzida com as variáveis, condutividade térmica k_s , a área da superfície de contato (ρ_k^2) e o coeficiente de acomodação (γ), identificados pelo modelo BS.

1.3.14. Determinação da difusividade térmica do leito

Para a determinação da difusividade térmica do leito (α_b) foi realizado um experimento através do método transiente com a aquisição de termogramas obtidos pelos termopares. A medida consistiu em desequilibrar a temperatura no interior da amostra através de um impulso térmico gerado pela dissipação de uma potência elétrica no centro de simetria do leito granular, no valor de 5 W.

As temperaturas foram registradas, nas posições de instalação dos sensores (R1-R4), em um intervalo de 3 segundos, e em um tempo total de 1.200 segundos, obtendo-se como resultado o perfil da temperatura (T) ao longo do tempo (t).

Segundo Incropera et al. (2015), em muitos casos, a geometria e/ou as condições de contorno impedem o uso de técnicas analíticas, entretanto, deve-se recorrer aos métodos

de diferenças finitas (ou elementos finitos) para prever a dependência da temperatura com o tempo dentro do sólido, bem como, as taxas de calor em seus limites. Portanto, nesse trabalho valeu-se do método de diferença finitas com intuito de resolver o problema de condução do calor em regime transiente.

A difusividade térmica do leite foi calculada pelo melhor ajuste dos dados experimentais com a solução numérica da equação de transferência de calor unidimensional em coordenadas cilíndricas. Para tanto, definiu-se o modelo matemático, o método numérico e o algoritmo, como verificado nas seções seguintes.

Com a determinação da difusividade térmica determinou-se o calor específico do leite que foi calculado e permitindo realizar uma comparação desse último com o obtido experimentalmente e verificou-se a precisão do método transiente.

1.3.15. Modelagem matemática

Para o estudo numérico da determinação da difusividade térmica, foi considerado inicialmente a descrição física do processo para estabelecer o modelo matemático simplificado, que se embasa nas seguintes considerações:

- O processo ocorre na região compreendida entre dois cilindros concêntricos de raios $R1 = 11,573$ mm e $R4 = 38,829$ mm, determinado as coordenadas cilíndricas;
- O cilindro é considerado infinito, o que estabelece o regime unidimensional;
- A condutividade térmica é considerada constante durante o processo;
- A temperatura inicial da amostra na região em estudo é uniforme ao longo do raio, o que leva à condição inicial;
- O aquecimento da amostra ocorre a partir de $R1$, sendo homogêneo ao longo de todo raio;
- As temperaturas em $R1$ e $R4$ estabelecem as condições de contorno.

Aplicando a equação de calor em coordenadas cilíndricas unidirecional sem geração de energia:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}; \quad R1 < r < R4 \quad (21)$$

Considerando a condição inicial e de contorno de Dirichlet:

$$T(r, t = 0) = T_0 \quad (22)$$

$$T(r = R1, t) = T_e(R1, t) \quad (23)$$

$$T(r = R4, t) = T_e(R4, t) \quad (24)$$

sendo,

T_e , é a temperatura obtida experimentalmente na posição R1 e R4, localizados na linha radial do fluxo de calor, de acordo com a Figura 16.

1.3.16. Método numérico

A solução da equação (21) foi calculada por diferença finitas explícito. A equação de diferença finitas é escrita a longo do tempo e para cada ponto da região (RT= R1-R4), onde RT é o espaço de confinamento estudado, segundo o estabelecimento de Δr (=RT/m), intervalo espacial entre as determinações, e Δt , intervalo temporal.

A convenção para a discretização é $T_j^i = T(i\Delta t, r\Delta r)$, onde o índice i está relacionado com o tempo e o índice j está relacionado com o espaço.

A discretização da equação (21) pelo método explícito é:

$$T_j^i = Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{r(j)} \right) T_{j-1}^{i-1} + \left(Fo \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) T_j^{i-1} + Fo T_{j+1}^{i-1} \quad (25)$$

onde,

$i = 1, 2, 3, \dots, p$;

$p =$ números de divisões no tempo;

$j = 1, 2, 3, \dots, m$; $j=1 \Leftrightarrow R1$ e $j = m \Leftrightarrow R3$;

$m =$ número de divisões no espaço;

Fo = número de Fourier = $\alpha \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right)$;

α = difusividade térmica (m²/s)

r(j) = raio relacionado a cada ponto no espaço estudado (m);

A condição inicial (22) é:

$$T_j^1 = T_0, \quad j=1, \dots, m \quad (26)$$

As condições de contorno são;

$$T_1^i = Te_1^i, \quad i=1, \dots, p \quad (27)$$

$$T_m^i = Te_m^i, \quad i=1, \dots, p \quad (28)$$

onde,

Te_1^i e Te_m^i , são as temperaturas obtida experimentalmente (°C)

No Apêndice C é demonstrado o desenvolvimento da discretização da equação (21).

De acordo com Incropera (2015), o critério de estabilidade é determinado pela exigência de que o coeficiente associado ao nodo de interesse (T_j^i) no instante anterior (T_j^{i-1}) seja maior ou igual a zero. Para a equação (25) este critério de estabilidade se expressa como:

$$\left(Fo \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) \geq 0 \quad (29)$$

Pelo qual se determina o critério mínimo de estabilidade a ser satisfeito dado por $Fo \leq \frac{1}{2}$, isto é:

$$\alpha \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right) \leq \frac{1}{2} \quad (30)$$

Para valores estabelecidos de Δr e α , o critério de estabilidade pode ser usado para determinar o valor máximo permissível para o valor de Δt .

1.3.17. Algoritmo

Foi utilizado o programa computacional MATLAB para executar o algoritmo do modelo numérico descrito na seção anterior, com objetivo de determinar o valor da difusividade térmica do leite, α_b que produz o menor desvio padrão dos resíduos entre os dados experimentais e os numéricos.

O desvio padrão dos resíduos é:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum(T_j^i - Te_j^i)^2}{p - 1}} \quad (31)$$

onde,

σ_r é o desvio padrão dos resíduos.

Te_j^i é a temperatura obtida experimentalmente (°C)

O Apêndice D apresenta o algoritmo para resolução da 2ª Lei de Fourier para coordenadas cilíndricas.

1.3.18. Determinação do calor específico do leite

A determinação experimental do calor específico da amostra de brita AB-01 foi realizada por meio da técnica DSC, utilizando-se o um calorímetro diferencial de varredura da marca *Simutaneous ThermalAnalyzer 650 – SDT650* da TA Instruments® pertencente ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos do DEER/CEAR da UFPB.

Como o equipamento foi previamente calibrado com safira, o erro apresentado na determinação da capacidade térmica foi de < 1%, conforme informado pelo o Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos do DEER/CEAR da UFPB, sob a responsabilidade da Prof. Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva. Nesta análise foi usado argônio de alta pureza como gás de arraste e safira.

Para a caracterização termoanalítica foram utilizados cadinhos de platina com massa de amostra de 64,360 mg sob atmosfera dinâmica de Argônio (50 mL min⁻¹), com aquecimento de 20 °C min⁻¹ e temperatura na faixa de 25 a 900 °C.

Para a obtenção dos valores de calor específico, na faixa de temperatura estudada, foi empregada a equação (32),

$$c_p = \frac{Q \times t}{m \times T} \quad (32)$$

onde,

c_p é calor específico da amostra (J/g°C);

Q é fluxo de calor (W/m);

t é o tempo (s)

T é a temperatura da amostra (°C)

Considerando para o valor de c_p a média do experimento realizando na faixa de 26 a 30 °C.

1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.4.1 Porosidade do leito fixo de brita

A determinação da porosidade do leito de brita foi realizada conforme método descrito na seção 1.3.3, obtendo-se a porosidade média constante, $\bar{\varepsilon}_b$ e o valor de 0,446, a porosidade média variável próxima a parede do leito, $\bar{\varepsilon}_{bw}$, o valor de 0,534 e, pela média ponderada, o valor da porosidade na parte central do leito de brita, ε_c o valor de $0,41 \pm 0,02$. Sendo este último o valor considerado para a porosidade do leito de brita ε_b . O apêndice A apresenta os valores obtidos experimentalmente por meio analítico para a obtenção da porosidade do leito de brita.

A Figura 25 mostra a curva da porosidade em função da distância normal da parede, observou-se que em até aproximadamente $\frac{1}{4}$ do diâmetro da partícula de distância da parede, a porosidade assume valores variáveis e propendendo para um valor constante em direção da parte central do leito.

Com pode ser verificado, a variação da porosidade próximo a parede do leito é bastante sensível. O volume da região próximo a parede do leito, corresponde a aproximadamente 31% do volume total do Becker, e a porosidade nessa região, produz um decréscimo de aproximadamente 9% na porosidade média do leito, o que implica em efeitos significativos na condutividade térmica efetiva do leito.

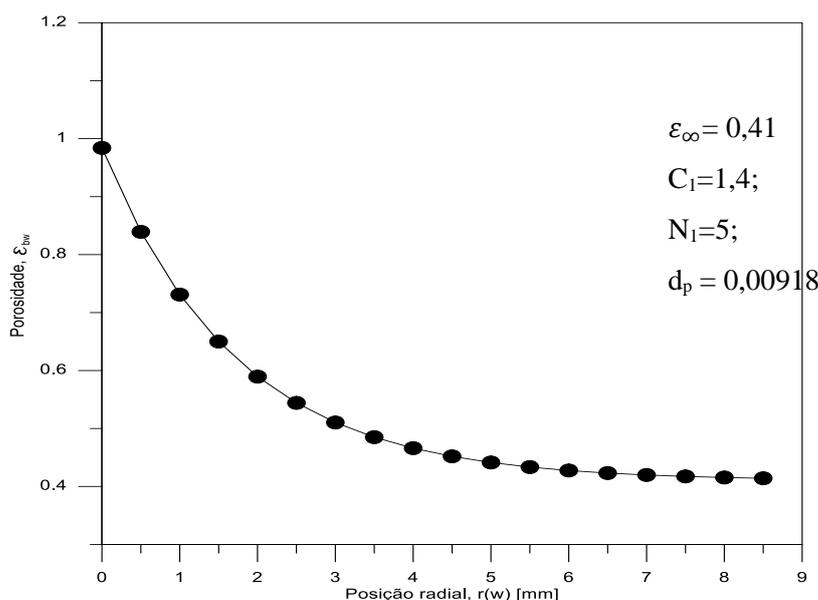


Figura 25. Porosidade versus a distância da parede do leito (1-r) (Diâmetro da partícula)

Fonte: Própria.

1.4.2 Caracterização física

A brita utilizada nos experimentos foi caracterizada fisicamente em função do seu conteúdo de massa específica (massa específica da partícula) e do diâmetro equivalente.

1.4.3. Massa específica do leito de brita

A massa específica média do leito de brita foi obtida experimentalmente, e os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado experimental da massa específica média do leito de brita.

Experimento	Massa específica (kg/m ³)
1	1266
2	1258
3	1289
4	1253
5	1261
6	1250
7	1257
8	1262
9	1242
10	1260
11	1284
12	1241
Média	1260,25
Desvio Padrão	14,47

Fonte: Própria

A massa específica do leito de brita ρ_b é igual a massa específica da parte central do leito obtida pela equação (6), encontrando-se o valor de $1347,86 \pm 80,9$ Kg/m³.

O resultado encontrado está dentro do intervalo requerido para granulados do tipo brita, de 1000 a 1500 kg/m³, conforme a Norma específica (ABNT, 2005, p. 9).

1.4.4. Dimensão característica das partículas de brita

A dimensão característica das partículas de brita, D, é calculada considerando o diâmetro de uma esfera de igual volume da partícula sólida. Como a amostra possui uma distribuição de tamanhos variados, a mesma foi dividida em “grandes” (≥ 10 mm) e

“pequenas” (<10 mm), a dimensão característica foi a média dos diâmetros equivalentes das partículas “grandes” e “pequenas”, obtendo o valor de $D = 8,59$ mm.

A Tabela 7 mostra os valores obtidos para a amostra com 174 britas, pesando 139 g. É observado na Figura 26, que apresenta uma foto da amostra de brita estudada, a grande distribuição de tamanho e a variedade de formas da amostra. Também nessa figura, pode ser verificada as irregularidades na superfície das partículas.

Tabela 7. Dimensão características das partículas de brita.

Amostra	Quantidade de britas (und.)	Peso Total (g)	Peso Médio unitário (g)	Volume da esfera (mm^3)	Diâmetro Equivalente (mm)	Percentual de Partículas na Amostra
Grande	59	79,00	1,339	556,95	10,21	57%
Pequena	115	60	0,522	217,03	7,46	43%
Média			0,799	332,28	8,59	100%

Fonte: Própria.

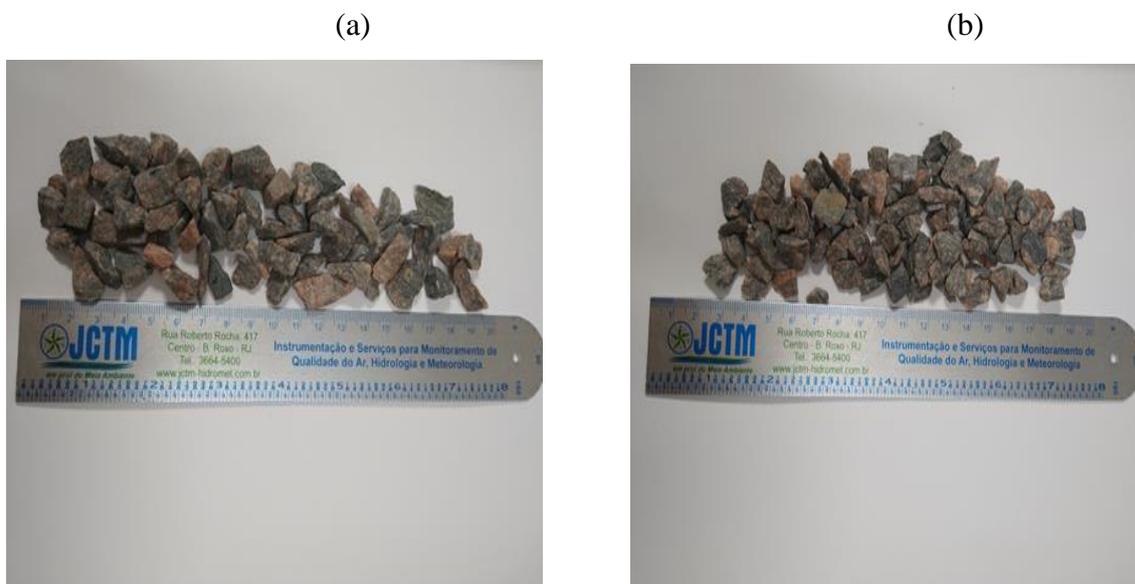


Figura 26. Amostra de brita. (a) britas com tamanhos grandes; (b) britas com tamanhos pequenos.

Fonte: Própria

Essas variações de distribuição de tamanho e forma das partículas sólidas é considerado no modelo BS, e tem efeitos significativos no cálculo da condutividade térmica do sólido k_s , na determinação do coeficiente de achatamento ϕ e no fator de acomodação γ .

1.4.5. Condutividade térmica efetiva do leito de brita

A condutividade térmica efetiva do leito de brita foi obtida experimentalmente utilizando os seguintes gases: ar, hélio e metano.

1.4.6. Condutividade térmica efetiva do leito com ar

A condutividade térmica efetiva do leito tendo o ar, à pressão atmosférica, como fluido interno foi mensurada em regime permanente. Cinco experimentos foram realizados variando a potência dissipada na resistência central. Através do sistema de aquisição de dados, os perfis de temperatura foram acompanhados até o regime estacionário para cada valor de potência do experimento.

O perfil da temperatura para a potência de 5 W até o regime estacionário, alcançado após 11 horas, foi demonstrado na Figura 27. Como resultado, obteve-se o gráfico $\ln(r)$ versus a temperatura (K), Figura 28, permitindo determinar o gradiente ($dT/d(\ln r)$), que, aplicado na equação (7), foi possível calcular diretamente a condutividade térmica efetiva do leito.

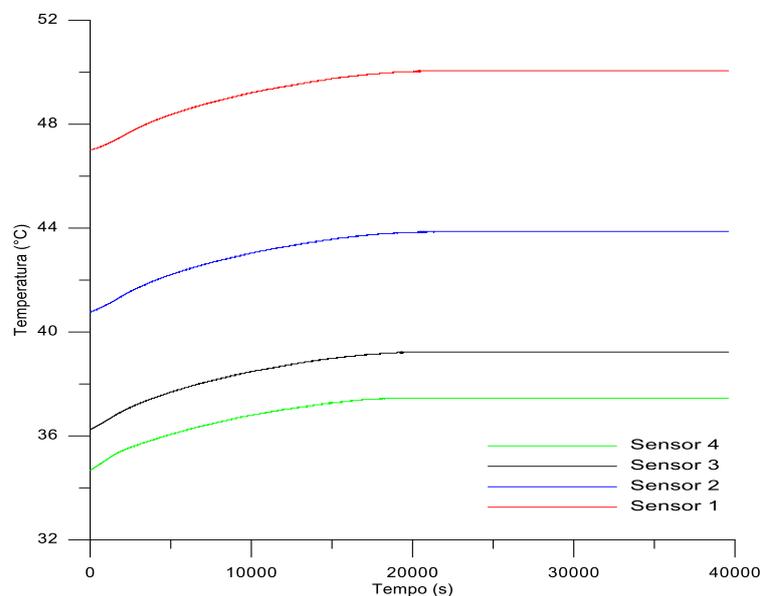


Figura 27. Perfil de temperatura, regime estacionário; potência 5 W.

Fonte: Própria

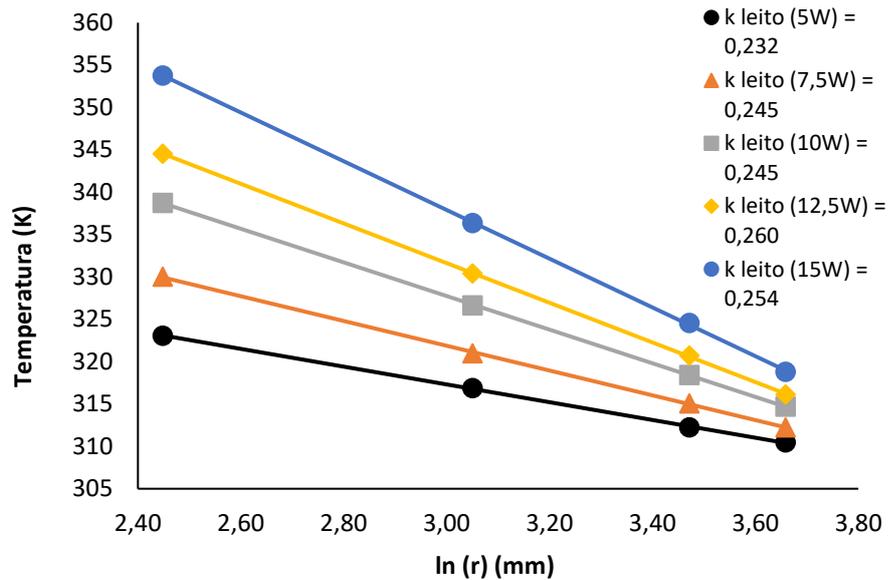


Figura 28. Valores de k_b (W/mK) em regime estacionário, com correção dos posicionamentos dos sensores; fluido Ar, 100 kPa.

Fonte: Própria

A Tabela 8 mostra os resultados da variação da condutividade térmica do leito de brita em diferentes potências. O resultado experimental em estado estacionário da condutividade térmica efetiva do leito, k_b , para a amostra de brita AB-01, com ar à pressão de 100 kPa, têm uma dispersão menor que 5% no valor da condutividade do leito, permitindo adotar o valor médio como a condutividade efetiva do leito, $k_b = 0,247 \pm 0,01$ W/mK.

Kömle (2010), apresentou em seus experimentos para a condutividade térmica efetiva o valor de 0,22-0,24 W/mK para britas carbonáticas e 0,19-0,21 W/mk para britas graníticas.

Tabela 8. Condutividade térmica efetiva do leito na presença do gás ar.

Experimento N.º	Potência(W)	dT/d(lnr)	k_b (W/mK)
1	5	10,489	0,232
2	7,5	14,908	0,245
3	10	19,848	0,245
4	12,5	23,405	0,260
5	15	28,757	0,254
Média			0,247
Desvio Padrão			0,010

1.4.7. Condutividade térmica residual do leito

A determinação da condutividade térmica residual do leito em baixa pressão foi realizada conforme método citado na seção 3.6.2. Foram realizados 12 experimentos com a pressão do ar variando de 0,0056 kPa a 100 kPa. A Figura 29 apresenta o gráfico da condutividade k_b (W/mK) versus a pressão (kPa) dos resultados experimentais obtidos.

É possível observar que com o aumento do vácuo ocorreu uma diminuição da condutividade térmica do leito. O “ponto de ruptura” aconteceu quando a pressão atingiu o valor de 10,3 kPa onde o valor de k_b é igual a 0,237 W/mK. A pressão continuou a baixar até 0,056 kPa onde foi obtida a condutividade residual do leito no valor de 0,082 W/mK.

Dessa forma, é possível verificar o efeito do gás intersticial na condutividade térmica do leito onde k_b diminuiu com a pressão do ar somente quando a pressão atingiu valores menores do que 10 kPa, em que o espaço intergranular são muito menores do que o caminho livre médio das moléculas de gás.

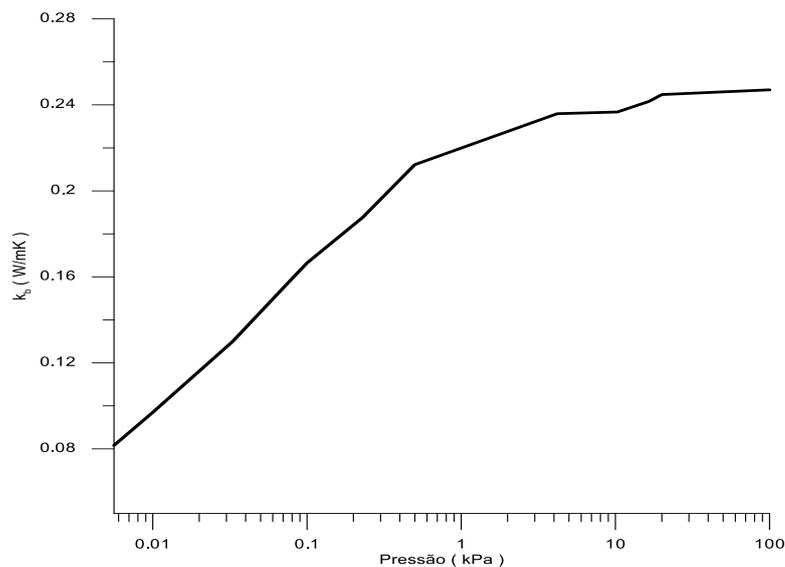


Figura 29. Condutividade térmica efetiva do leito, k_b sob pressão ar variado de 5,6 Pa a 100 kPa.

Fonte: Própria.

Os resultados obtidos com esse experimento serão utilizados no teste de sensibilidade do modelo BS a pressão reduzida.

1.4.8. Condutividade térmica efetiva do leito com outros gases

Aplicando o método direto para a determinação da condutividade térmica efetiva do leito, foram encontrados experimentalmente os valores da condutividade k_b para o leito de brita com gás metano e hélio a pressão de 100 kPa. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 9, onde pode-se observar, que além dos gases mencionados, também pode-se verificar os valores para o ar da pressão atmosférica. Na mesma tabela é mostrado os valores da condutividade térmica do gás, k_g .

Tabela 9. Condutividade térmica efetiva do leito, k_b , na presença do gás hélio, metano e ar; 100 kPa.

Gás	k_b (W/mK)	k_g (W/mK)
AR	0,245	0,028
Metano	0,278	0,036
Hélio	0,588	0,152

Fonte: Própria.

Observa-se que a condutividade do leito aumentou na proporção que foi utilizado gases com condutividade térmica maiores, isso demonstrou a contribuição da parcela gasosa no leito poroso.

1.4.9. Condutividade térmica do sólido (grão) utilizando o modelo de BS

A condutividade térmica do sólido, assim como a porosidade e os parâmetros secundários (área de achatamento, ρ_k^2 , e o coeficiente de acomodação, γ) foram identificados através do modelo BS, usando a técnica de identificação de variáveis.

Fixou-se apenas a porosidade entre o intervalo de 0,39 a 0,43, conforme medição experimental. Foi calculado simultaneamente os valores de k_s , ϵ_b e os parâmetros secundários para cada pressão obtida experimentalmente (0,056 kPa a 100kPa), até ser identificado o menor erro em relação a condutividade térmica efetiva do leito, k_b ,

Esse procedimento foi realizado para a geometria das partículas de brita na forma esférica, quebrada, cilíndrica e mistura, sendo esse último uma mistura binária de esferas com 57% de partículas com 10,21 mm de diâmetro e 43% com 7,46 mm de diâmetro, pois, como exposto anteriormente, a amostra de brita apresenta formas bastante irregulares, identificando-se k_s , ϵ_b , ρ_k^2 e γ para cada formato geométrico.

A Tabela 10 apresentam resultados para os parâmetros k_s , ϵ_b , ρ_k^2 e γ , assim como os erros, para diferentes formatos geométricos de partículas sólidas.

Tabela 10. Condutividade térmica da partícula sólida, k_s , porosidade e parâmetros secundários obtidos pelo modelo BS, com leito de brita/ar.

Parâmetros	Esféricas	Quebradas	Cilíndricas	Misturas*
D (mm)	8,6	8,6	5,52	D1=10,21mm D2= 7,46 mm
k_s (W/mK)	1,29	1,36	0,73	1,08
$\epsilon_b(0,41\pm-0,02)$	0,41	0,43	0,42	0,43
ρ_k^2	0,001	0,001	0,006	0,001
γ	0,450	0,450	0,600	0,500
ϵ	0,90	0,90	0,90	0,90
erro	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$

*Mistura binária de esfera D1=10,21 (57%) e D2 = 7,46 (43%).

Fonte: Própria

Em seguida, foi realizado o estudo de sensibilidade em pressão reduzida a partir da pressão atmosférica, para verificar os efeitos dos parâmetros identificados na condutividade térmica do leito de britas sob o ar atmosférico.

O estudo de sensibilidade as baixas pressões foram realizadas com a pressão do ar variando no intervalo de $1 \cdot 10^{-5}$ kPa a 100 kPa, obtendo-se um total de 51 pontos de identificação da condutividade do leito de brita utilizando k_s , ϵ_b e os parâmetros secundários.

O estudo da sensibilidade em pressões reduzidas foram conduzidos para cada variável estudada (k_s , ε_b , ρ_k^2 e γ), e também para o efeito da variação da massa específica do leito, variando o percentual das partículas, com 10,21 mm de diâmetro, dentro do leito, entre os intervalos de 0 a 100%. Foram utilizados os experimentos em pressão reduzidas, conforme resultados obtidos na seção 4.3.2, no total de 12 experimentos.

A seguir são apresentados os gráficos com os resultados obtidos no estudo de sensibilidade do leito nas baixas pressões, conforme as Figura 30 a 34.

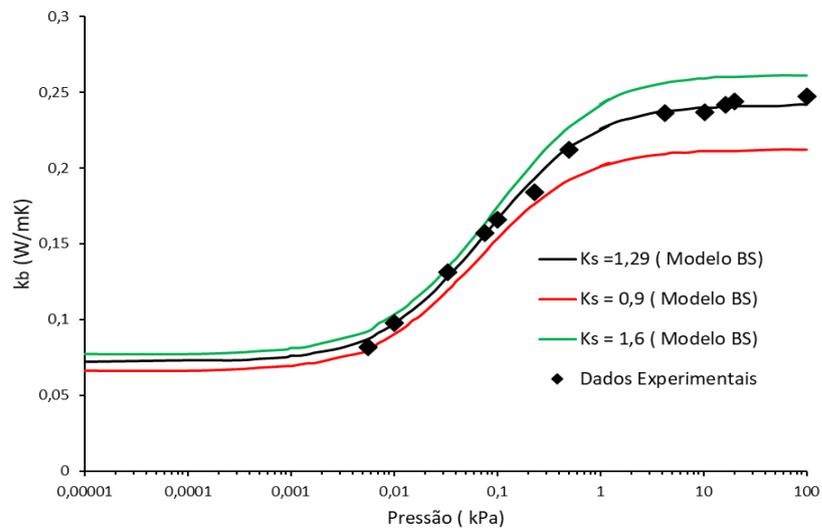


Figura 30. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários k_s . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $\varepsilon_b=0,41$; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$.

Fonte: Própria.

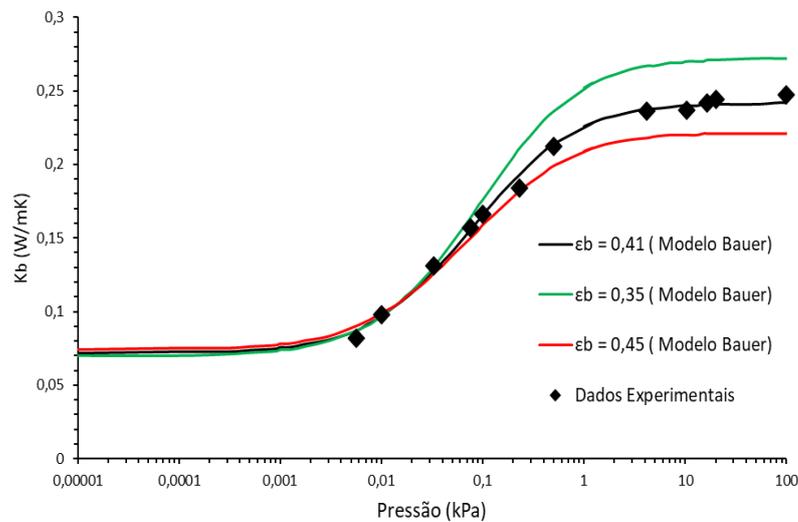


Figura 31. Estudo de sensibilidade do modelo BS para várias porosidades ε_b . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar; $k_s=1,29$ W/mK; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$.

Fonte: Própria.

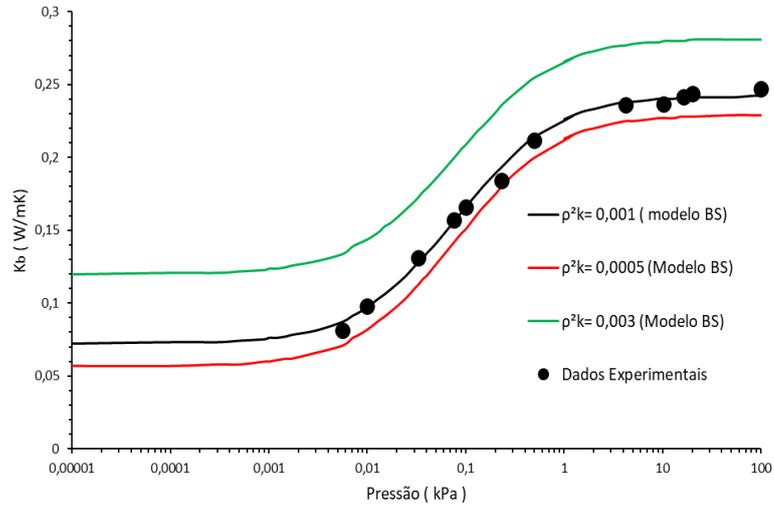


Figura 32. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários ρ_k^2 . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s=1,29$ W/mK; $\gamma=0,45$; $\varepsilon_b=0,41$.

Fonte: Própria.

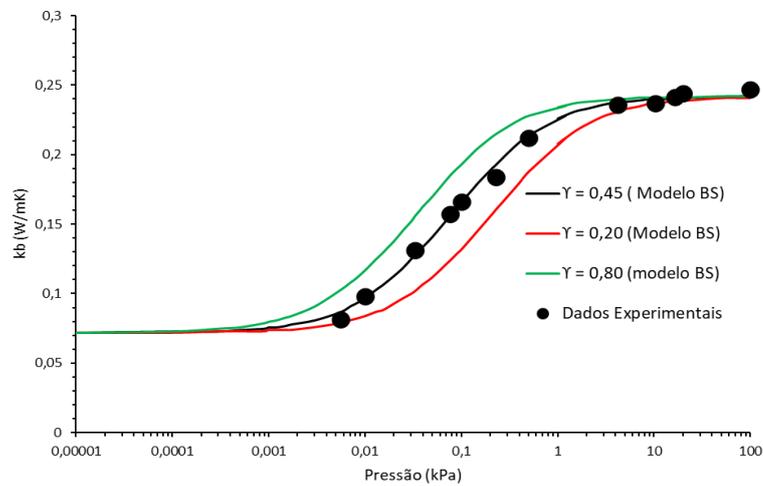


Figura 33. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários coeficientes de acomodação, γ . Forma da partícula: esfera; Pressão do leito: 10^{-5} kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s=1,29$ W/mK; $\varepsilon_b=0,41$; $\rho_k^2=0,001$.

Fonte: Própria

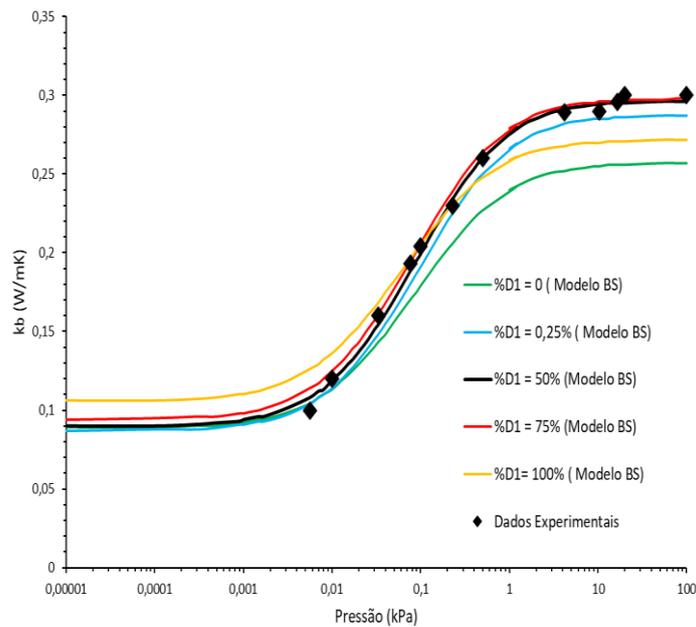


Figura 34. Estudo de sensibilidade do modelo BS para a variadas concentrações de partículas com diâmetro, $D1 = 10,21\text{mm}$. Forma da partícula: Mistura binária de esferas; Pressão do leito: 10-5 kPa – 100 kPa; Leito: brita/ar. $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\epsilon_b=0,41$; $\rho_k^2=0,001$; $\gamma=0,45$.

Fonte: Própria.

É possível verificar pelo estudo de sensibilidade da pressão reduzida que, para a amostra de brita estuda, a condutividade térmica do leito na baixa pressão foi sensível na área de contato entre as partículas (achatamento), ρ_k^2 e a distribuições das partículas maiores a partir de 75%, porém, para coeficiente de acomodação γ , a sensibilidade ocorreu apenas em pressões reduzidas intermediária e, quando o vácuo foi aumentando, a sensibilidade acabou. Verificou-se também, que o a condutividade térmica do leito foi sensível aos valores de k_s , ϵ_b e a distribuição dos tamanhos nas pressões relativamente altas.

As curvas obtidas com as variáveis identificadas no modelo BS apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais, corroborando com os resultados encontrados, na Tabela 10.

O estudo de sensibilidade sob pressão em 1 atm, foi conduzido pelo modelo BS. E os resultados foram apresentados nas Figura 35 a 38.

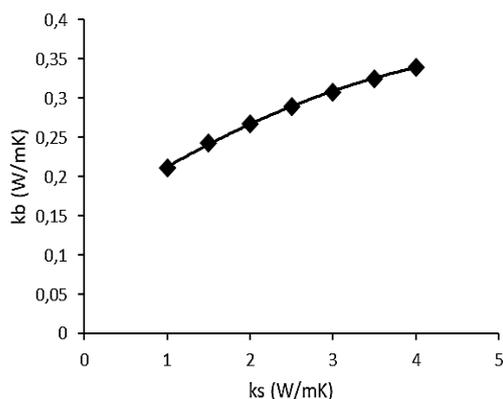


Figura 35. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários k_s ; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $\varepsilon_b=0,41$; $\rho_k^2=0,001$; $\gamma=0,45$. **Fonte:** Própria.

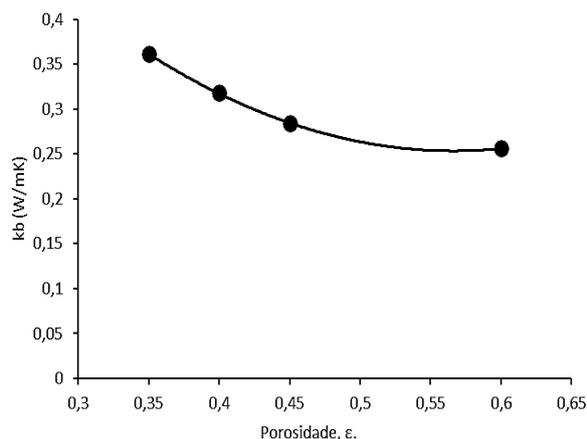


Figura 36. Estudo de sensibilidade do modelo BS para várias porosidades; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\rho_k^2=0,001$; $\gamma=0,45$. **Fonte:** Própria.

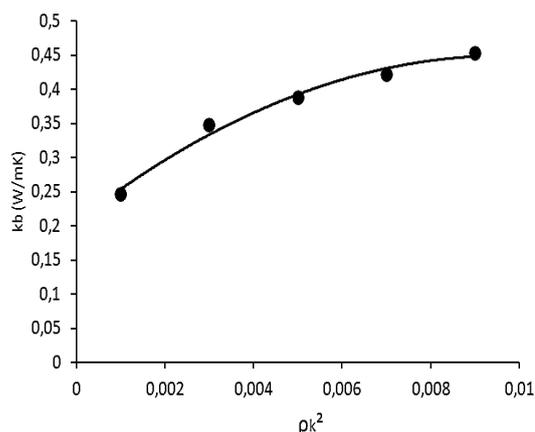


Figura 37. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários ρ_k^2 ; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\varepsilon_b=0,41$; $\gamma=0,45$. **Fonte:** Própria.

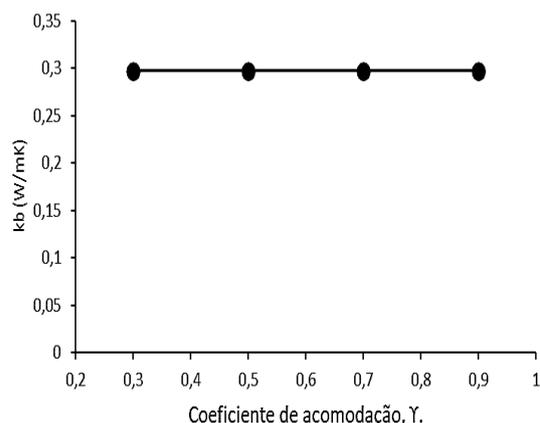


Figura 38. Estudo de sensibilidade do modelo BS para vários coeficientes de acomodação; Pressão: 1atm; Forma da partícula: Esfera; Leito: brita/ar; $k_s=1,29\text{W/mK}$; $\varepsilon_b=0,41$; $\rho_k^2=0,001$. **Fonte:** Própria.

Verificou-se que, a pressão elevada, a condutividade térmica do leito foi sensível a condutividade térmica da partícula, a porosidade do leito e a ρ_k^2 . Para o último, a condutividade térmica do leito apresentou sensibilidade tanto para pressões reduzidas como para elevadas, onde se espera apenas para pressões reduzidas (TSOTSAS; MARTIN, 1987).

Para o coeficiente de acomodação, a condutividade térmica do leito não apresentou sensibilidade nas pressões elevadas, pois nas pressões elevadas não foram verificados os efeitos de Knudsen.

Além das medidas com os dados do leito de brita e ar atmosférico, foram realizadas medições usando os gases metano e hélio, para obtenção de resultados. Com os valores das condutividades térmicas do leito sob o gás metano e hélio obtidos experimentalmente, e os parâmetros identificados pelo modelo BS, foram calculados a condutividade térmica do grão, k_s , para cada gás. Os valores da condutividade térmica do leito de brita, a condutividade térmica dos gases e a condutividade térmica do grão k_s relativo a cada gás é mostrado na Tabela 11.

Tabela 11. Condutividade térmica do leito, do gás e da partícula sólida na presença de vários gases.

Gases	Condutividade térmica do leito [W/mK]	Condutividade térmica do gás [W/mK]	Condutividade Térmica média da partícula sólida [W/mK]
Ar	0,245	0,026	1,11
Metano	0,278	0,036	1,13
Hélio	0,588	0,152	1,39
Média	***		1,21

Fonte: Própria.

A partir dos resultados obtidos da condutividade térmica do grão para cada gás, calculou-se a condutividade térmica referente à o grão de brita como a média aritmética dos resultados obtidos, sendo portanto a condutividade térmica do grão $k_s = 1,21 \pm 0,12$ W/m.K. Foi observado que os valores identificados de k_s são pouco dispersos, com um desvio de 0,0031, o que confirma a coerência do modelo BS e permite exprimir o valor médio da condutividade térmica do grão como valor para a brita AB-01.

Uma comparação entre a condutividade térmica efetiva do leito utilizando o modelo BS e a correlação estimada por Gonzo (2002), foi realizada utilizando a condutividade térmica da partícula sólida relativo a cada gás estudado (ar, metano e hélio) e porosidade do leito igual a 0,41, a tabela 12 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 12. Condutividade térmica efetiva do leito de brita, k_b , calculada pelo modelo BS e pela correlação de Gonzo (2002), para k_s na presença do ar, metano e hélio e $\varepsilon_b = 0,41$.

Gás	Condutividade térmica do gás (W/mK)	Condutividade Térmica do Sólido (W/mK)[Modelo BS]	Condutividade Efetiva do Leito (W/mK) [Modelo BS]	Condutividade Térmica Efetiva do Leito (W/mK) [Gonzo,(2002)]
Ar	0,026	1,11	0,247	0,189
Metano	0,036	1,13	0,278	0,226
Hélio	0,152	1,39	0,588	0,514

Fonte: Própria.

A condutividade térmica do leito, k_b , sob ar atmosférico calculada pelo modelo BS é aproximadamente 31% maior do que a calculada pela correlação de Gonzo (2002). Isso ocorre porque a correlação de Gonzo (2002) é um modelo simplificado que considera apenas o efeito da condutividade térmica do gás, do sólido e a porosidade.

1.4.10. Estudo das formas dos grãos do leito de brita

Nessa seção será realizado um estudo para identificar as formas das partículas de britas. O modelo BS foi utilizado com a suposição que as partículas, apresentam as seguintes formas geométricas: esfera, quebrada, cilíndrica e mistura (mistura binária de esfera). O estudo é realizado com o leito em baixas pressão utilizando os dados experimentais e os parâmetros obtidos com o modelo BS, sob ar atmosférico.

As Figura 39-37 mostram os gráficos como os resultados da condutividade térmica efetiva do leito obtida experimentalmente e utilizando o modelo BS para as diferentes formatos de partículas (esférica, cilíndrica, quebradas e mistura).

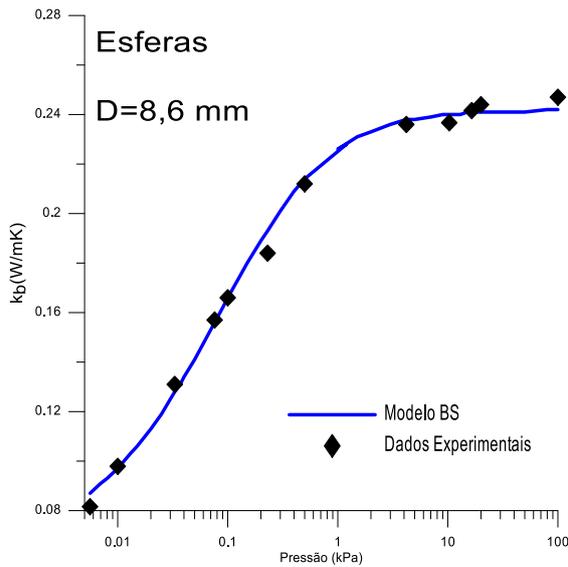


Figura 39. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma esférica; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,405$ e $D=8,6$ mm. **Fonte:** Própria.

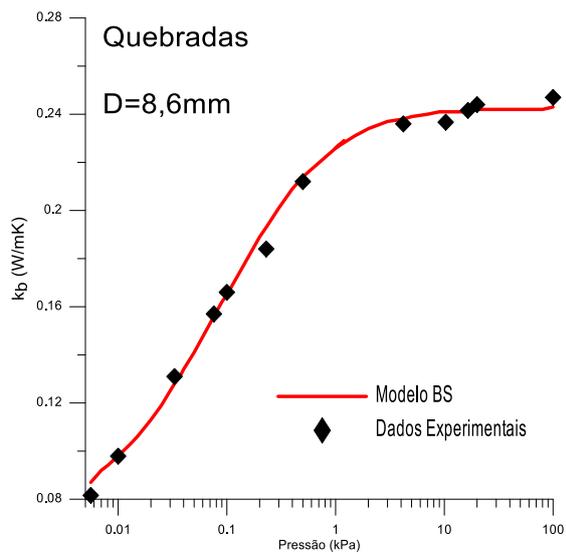


Figura 40. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma quebrada; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,45$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,43$ e $D=8,6$ mm. **Fonte:** Própria.

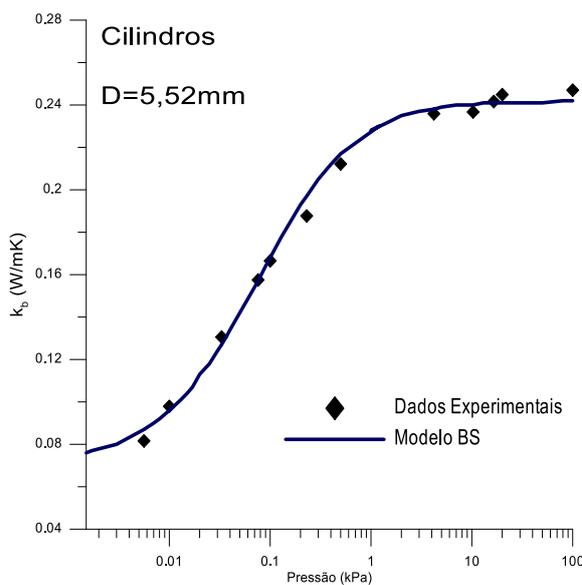


Figura 41. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita na forma cilíndrica; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,60$; $\rho_k^2=0,006$; $\epsilon_b=0,42$ e $D=5,52$ mm. **Fonte:** Própria.

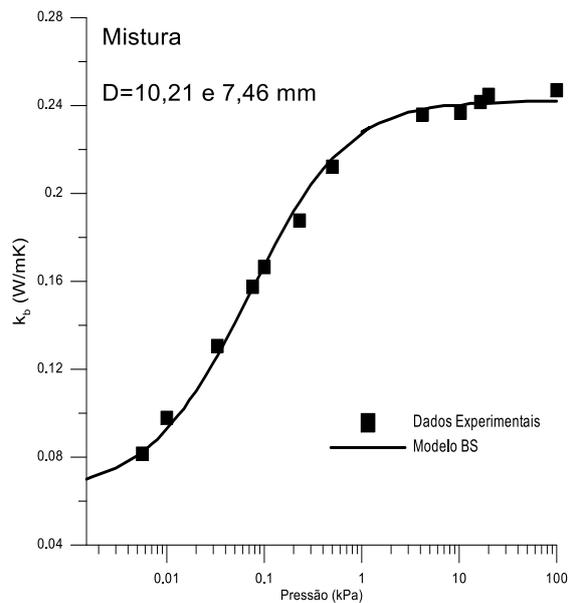


Figura 42. Condutividade térmica do leito de brita, k_b (W/mK) em função da pressão do ar (Pa). Partículas de brita com mistura binária de esferas; $k_s=1,056$ W/mk; $\epsilon = 0,9$; $\gamma=0,50$; $\rho_k^2=0,001$; $\epsilon_b=0,43$ e $D=10,21$ e $7,46$ mm. **Fonte:** Própria.

O erro médio absoluto e o desvio padrão dos resíduos das curvas dos gráficos das Figura 39-37 estão representados na Tabela 13, demonstrando um ótimo ajuste da curva do modelo BS em relação a curva obtida experimentalmente.

Tabela 13. Erro médio absoluto e desvio padrão das curvas obtidas pelo modelo B.S.

	Esféricas	Quebradas	Cilíndricas	Misturas
Erro Médio Abs. [x10⁻⁵]	1,15	1,08	1,94	1,68
Desvio Padrão	0,0034	0,0033	0,0044	0,00410

Fonte: própria

O estudo mostra que a forma da partícula de brita pode ser considerada uma esfera, um cilindro, quebrada ou mistura, pois, as curvas obtidas pelo modelo BS, apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais, fato que foi confirmado com o baixo desvio padrão.

O estudo também corrobora com a confirmação dos parâmetros identificados pelo modelo BS.

1.4.11. Determinação da difusividade térmica do leito de brita

1.4.12 Método experimental em regime transiente

Aplicando o método transiente, foi possível encontrar experimentalmente o valor da difusividade térmica do leito, α_b , sob ar atmosférico. A Figura 43 exhibe os perfis de temperatura obtido pela solução numérica da equação (21) para os valores de α_b e o perfil de temperatura obtido na posição $R2 = 21,130 \pm 0,119$ mm.

Os resultados da variação da temperatura foram obtidos após terem sido determinados através do $\Delta r = 0,0034$ mm, o critério de estabilidade foi obtido por: $Fo = 1/2$ e $\Delta t = 5$ s. É possível observar visualmente que para $\alpha_b = 2,37 \times 10^{-7}$ m²/s, a curva da solução numérica apresenta uma boa concordância com a curva experimental T (R2, t). Isso é confirmado pelo erro quadrático médio de $6 \cdot 10^{-4}$ com desvio padrão de 0,0245 entre as curvas (Figura 43).

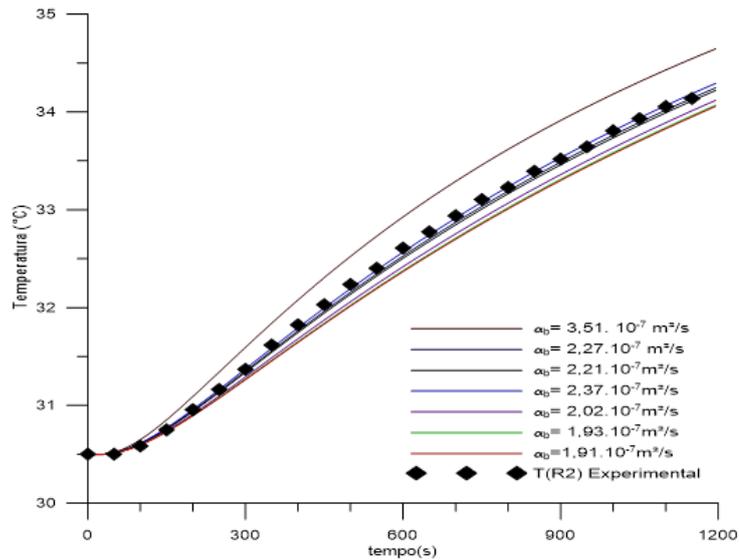


Figura 43. Perfil da temperatura, para diferentes valores de α_b , produzidas pelo método numérico em comparação com o perfil de temperatura obtido experimentalmente, T(R2).

Fonte: Própria.

A Tabela 14 apresenta a média quadrática dos erros e o desvio padrão dos resíduos entre as curvas, produzidas pelo método numérico com diferentes valores de α_b e a curva T (R2, t).

Tabela 14. Erro médio e desvio padrão dos erros entre as curvas numéricas e a curva T (R2, t) da Figura 43.

Figura 43

α_b (m ² /s)	<i>ERRÔ</i>	σ^{**}
$3,51 \cdot 10^{-7}$	0,0962	0,3101
$2,37 \cdot 10^{-7}$	0,0006	0,0245
$2,27 \cdot 10^{-7}$	0,0019	0,0441
$2,21 \cdot 10^{-7}$	0,0040	0,0630
$2,02 \cdot 10^{-7}$	0,0192	0,1384
$1,93 \cdot 10^{-7}$	0,0311	0,1763
$1,90 \cdot 10^{-7}$	0,0341	0,1846

* Média quadrática dos erros.

** Desvio padrão dos erros.

Os termogramas produzidos pelo experimento em regime transiente com os termopares na posição R1 = $11,573 \pm 0,025$ mm, R2 = $21,130 \pm 0,119$ mm e R4 = $38,829 \pm 0,179$ mm, e o perfil de temperatura pela solução numérica, com $\alpha_b = 2,37 \cdot 10^{-7}$ m²/s, são mostrados na Figura 44.

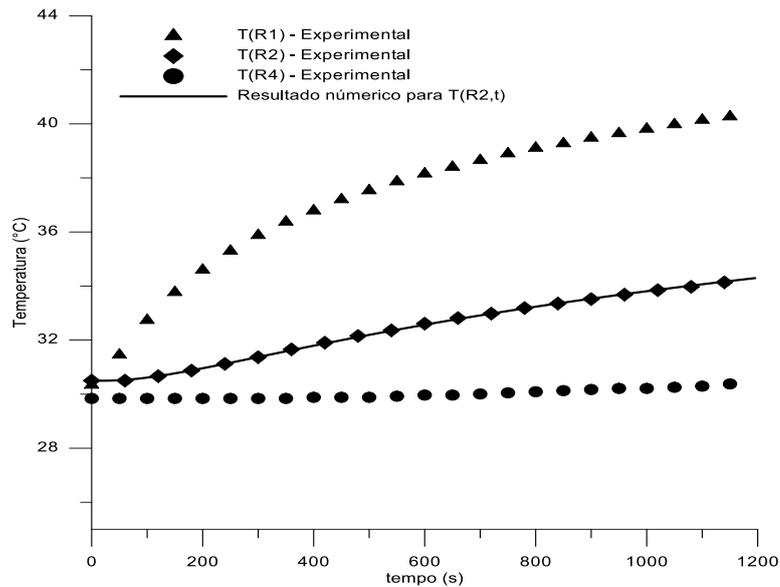


Figura 44. Termogramas produzidos pelo método experimental transiente. A linha sólida é a curva da solução numérica, $\alpha_b = 2,37 \cdot 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ que sobrepõe os pontos registrados pelo sensor R2 e sujeita as condições de contorno registrados pelos sensores R1 e R4.

Fonte: Própria.

Verifica-se uma boa concordância entre o resultado numérico e o experimental, confirmados pelos baixos resíduos produzidos.

Devido a difusividade ser uma função da condutividade térmica, da massa específica e do calor específico do leito, o erro absoluto estimado para o método transiente é de 15%, desta forma, é tomado o valor de $\alpha_b = 2,37 \cdot 10^{-7}$ (erro absoluto de 15%).

Como é conhecida a difusividade térmica (α), ela se relaciona com a condutividade térmica (k) e o calor específico (c_p) pela expressão $\alpha = k/(\rho \cdot c_p)$, onde ρ é a massa específica (kg/m^3). Com os valores do α_b e k_b , determinados experimentalmente, é possível pela expressão anterior, determinar c_p , mas nesse trabalho c_p foi determinado, de acordo o estudo da precisão do método experimental em regime transiente.

1.4.13. Determinação do calor específico

O calor específico c_p da amostra de brita AB-01 foi obtido experimentalmente pelo método da calorimetria explanatória diferencial (DSC), na faixa de 25 a 900 °C, empregando-se as seguintes condições experimentais na análise: taxa de aquecimento de 20 °C/min e a vazão do gás de 50mL/min em massa da amostra de 64,360 mg.

O Apêndice B demonstra a figura da curva DSC da amostra de brita, a partir da qual calcula-se o valor de c_p , assim como a tabela da variação de c_p na faixa de 26 a 30 °C.

A Figura 45 expõe a variação do c_p com a temperatura, onde foram calculados pela Equação (32) na faixa de 25 a 900 °C. O calor específico médio para a faixa de temperatura de 26 a 30 °C é de $822,06 \pm 4,0$ J/kgK.

O valor de c_p obtido foi substituído pelos valores de k_b ($= 0,247$ W/mK) e α_b ($= 2,37 \cdot 10^{-7}$ m²/s) na relação $\alpha = k/(\rho \cdot c_p)$, com $\rho_b = 1347,86$ kg/m³, igual a $773,22 \pm 224,2$ J/kgK. Esse resultado mostra que o método experimental em regime transiente é uma técnica sem boa precisão para a determinação de c_p , visto que a técnica DSC utilizada, apresenta um erro $< 1\%$.

Jones apud Allen et al. (2014), apresentaram o valor de c_p de 810 a 880 J/kgK a 25 °C para diversas rochas estudadas.

Segundo a ABNT (2005) a brita possui um calor específico de 800 J/kgK.

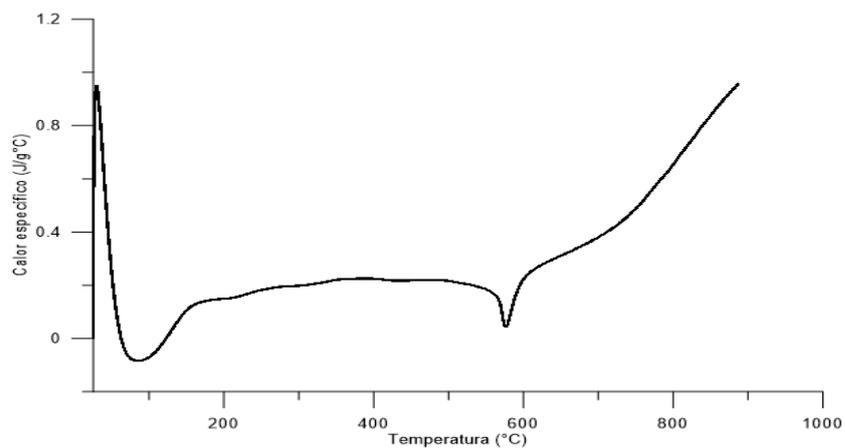


Figura 45. Variação do calor específico (c_p) para amostra de brita AB-01.
Fonte: Própria.

1.5. CONCLUSÕES

A amostra de rochas de brita AB-01 coletadas na região do Semiárido brasileiro foi caracterizada termicamente no que se refere a condutividade e a difusividade térmica e o calor específico e servem para a utilização nos sistemas de estocagem de energia térmica de calor sensível para aplicações residenciais, industriais e usinas termosolares.

Por método da transferência de calor unidimensional em regime permanente foi obtido experimentalmente a condutividade térmica média do leito fixo de rochas de brita sob diferentes tipos de gases (ar, metano e hélio), obtendo o valor de $0,247 \pm 0,01$ W/mK para o ar atmosférico a 100 kPa.

A condutividade térmica média da partícula sólida foi calculada por interação, utilizando o modelo de Bauer e Schlünder, considerando o efeito da variação da porosidade próxima a parede do leito fixo de brita, onde a variação das dimensões das partículas, o efeito da radiação e das baixas pressões, obtiveram um valor médio de $1,21 \pm 0,12$ W/mK e sob a presença do ar atmosférico foi de $1,11 \pm 0,11$ W/mK.

O calor específico da amostra de brita foi obtido experimentalmente pelo método da calorimetria explanatória diferencial (DSC) na faixa de 25 a 900 °C, encontrando-se o valor de $822,06 \pm 4,0$ J/kgK. Para a difusividade térmica foi utilizado o método experimental de transferência de calor unidimensional em regime transiente, encontrando $\alpha_b = 2,37 \cdot 10^{-7}$ com erro absoluto de 15%.

É importante considerar a variação da porosidade na parede do leito fixo pois esse efeito afeta o resultado da condutividade térmica da partícula sólida e do valor da massa específica média do leito.

Os estudos de sensibilidade do modelo BS em baixas pressões do leito fixo sob ar atmosférico permitiram evidenciar a influência da região de contato entre os grãos de brita, (ρ_k^2). A distribuição do tamanho das partículas e o coeficiente de acomodação, γ , na condutividade térmica de efetiva do leito de brita, verificou-se que o coeficiente de acomodação não apresentou efeito sobre a condutividade térmica do leito em pressões abaixo de 10^{-3} kPa.

Os estudos de sensibilidade do modelo BS com a pressão de 1 atm. permitiram verificar que a região de contato entre os grãos de brita (ρ_k^2), provocaram alterações na condutividade térmica do leito em médias pressões.

Houveram limitações nos testes operacionais para a obtenção de medidas da condutividade, obtendo pressões menores que 0,0056 kPa. Sugere-se, como continuidade

deste trabalho, que se procedam medidas na faixa de pressão de 10^{-5} a 0,0056 kPa para verificar a ocorrência ou não do efeito de Knudsen.

A sensibilidade de parâmetros do modelo BS ocorreu também na faixa de pressão acima da pressão atmosférica, nas quais a condutividade do grão e a porosidade são sensíveis. Medidas com pressões superiores a 1 bar não foram possíveis de serem realizadas. Segue-se, portanto, como sugestão, a verificação dos efeitos da pressão sobre estes parâmetros, realizando-se medidas na faixa de pressão de 5 a 30 bar.

A importância da determinação da condutividade térmica do sólido encontra-se a resposta através do estudo da dinâmica de reatores, quando requer que o número de Biot, seja menor do que 0,1.

A condutividade térmica média do grão de brita foi determinada a partir do modelo BS pela média dos valores encontrados por meio de três gases distintos: ar, metano e hélio. O modelo mostrou-se estável para os 3 gases em diferentes condutividades térmicas, conduzindo a determinação condutividade média de brita.

O estudo de sensibilidade do modelo BS corroborou para a identificação do resultado obtido no presente estudo, demonstrando a eficiência do modelo preditivo de Bauer-Schlünder usado na determinação deste parâmetro.

O método numérico das diferenças finitas se mostrou eficiente para a resolução da equação expressa no modelo matemático, uma vez garantida a condição de estabilidade para a determinação da difusividade térmica em regime transiente.

O método experimental em regime transiente mostrou-se ser mais rápido para determinar a difusividade térmica do leito, porém, no que se refere-se ao cálculo do calor específico, essa técnica não apresenta eficiência em relação a DSC utilizada nesse trabalho.

Só foi possível utilizar o método transiente com o leito na presença do ar atmosférico, por isso, sugere-se a realização do método com a utilização de outros gases, com intuito de verificar a sua precisão.

A capacidade térmica para 1 m³ de brita AB-01 é de 1,108 MJ/K. Mostrando-se bom potencial térmico a sua utilização em sistemas de armazenamento de energia térmica.

Esse trabalho mostrou as características térmicas da brita permitindo utiliza-las para estudos termodinâmicos e assim validar seu uso para armazenamento térmico de calor sensível para sistemas térmicos residenciais, industriais e usinas termosolares, oferecendo uma alternativa com material de baixo custo e alta disponibilidade, visando a substituição

dos sistemas que utilizam líquidos como armazenamento térmico de calor sensível, como a água, onde se torna inviável temperatura acima de 100 °C.

Outras pesquisas devem ser realizadas com a amostra de brita AB-01, com o objetivo de determinar a resistência e o tempo de carregamento e descarregamento de energia térmica. Mais pesquisas são necessárias utilizando outros tipos de rochas na região do Semiárido brasileiro para verificar as características e a sua viabilidade na utilização em sistemas de armazenamento térmico de calor sensível.

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, K. G.; BACKSTRÖM, T. W. VON; KRÖGER, D. G.; KISTERS, A. F. M. Rock bed storage for solar thermal power plants: Rock characteristics, suitability, and availability. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 126, p. 170–183, 2014.

ALMENDROS-IBÁÑEZ, J. A.; FERNÁNDEZ-TORRIJOS, M.; DÍAZ-HERAS, M.; BELMONTE, J. F.; SOBRINO, C. A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds. **Solar Energy**, n. 1, p. 0–1, 2018.

ALVA, G.; LIN, Y.; FANG, G. An overview of thermal energy storage systems. **Energy**, v. 144, p. 341–378, 2018.

ANDERSON, R.; BATES, L.; JOHNSON, E.; MORRIS, J. F. Packed bed thermal energy storage: A simplified experimentally validated model. **Journal of Energy Storage**, v. 4, p. 14–23, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15220-2:2005 Versão Corrigida: **2008 Desempenho térmico de edificações Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. [s.l.: s.n.].

BAUER, R.; SCHLUNDER, E. Effective radial thermal-conductivity of packings in gas-flow. 2. Thermal-conductivity of packing fraction without gas-flow. **International Chemical Engineering**, v. 18, p. 189–204, 1978.

BENOIT, H.; SPREAFICO, L.; GAUTHIER, D.; FLAMANT, G. "Revisão de fluidos de transferência de calor em receptores de tubo usados em sistemas térmicos solares de concentração: Propriedades e coeficientes de transferência de calor," *Energia renovável e sustentável Comentários*. **Elsevier**, v. 55, p. 298-315, 2016.

BRASIL. **Plano decenal de expansão de energia 2019**. Brasília, DF: MME/EPE, 2010.

BRUCH, A.; FOURMIGUE, J. F.; COUTURIER, R.; MOLINA, S. Experimental and numerical investigation of stability of packed bed thermal energy storage for CSP power plant. **Energy Procedia**, v. 49, p. 743–751, 2014.

CASTRO, L. C. **Análise comparativa para geração de energia heliotérmica em diferentes regiões brasileiras**. 2016.

CHANDRASEKHARA, B. C.; VORTMEYER, D. Flow model for velocity distribution in fixed porous beds under isothermal conditions. **Wärme- und Stoffübertragung**, v. 12, n. 2, p. 105–111, 1979.

CHAVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 119 - 134, 2014.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. DE; CUNHA, T. J. F.; JESUS JUNIOR, L. A. DE; ARAUJO, J. L. P. A região semiárida brasileira. Produção de caprinos e ovinos no Semiárido. **Embrapa Semiárido**, n. 1, p. 21-48, 2011.

COUTIER, J. P.; FARBER, E. A. Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds. **Solar Energy**, v. 29, n. 6, p. 451–462, 1982.

DIAGO, M.; INIESTA, A. C.; SOUM-GLAUDE, A.; CALVET, N. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology. **Applied Energy**, v. 216, n. 1, p. 402–413, 2018.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; WOREK, W. M. **Solar Engineering of Thermal Processes**, 4nd ed. [s.l: s.n.]. v. 116, 2003.

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. **Igneous Rock**, 2020. (Nota técnica).

ENCYCLOPEDIA, B. O. **Rocks Encyclopedia Britannica**, Inc., 2019. (Nota técnica).

ERREGUERAGUI, Z.; BOUTAMMACHTE, N.; BOUATEM, A.; MERROUN, O.; ZEMMOURI, E. L. M. Packed-bed Thermal Energy Storage Analysis: Quartzite and Palm- Oil Performance. **Energy Procedia**, v. 99, n. 1, p. 370–379, 2016.

EWEA. **Powering Europe: wind energy and the electricity grid**. Brussels: EWEA, 2010.

FURNAS, C. C. **Heat Transfer from a Gas Stream**. Washington U. S. Department Of Commerce, 1932.

GIL, A.; MEDRANO, M.; MARTORELL, I.; LÁZARO, A.; DOLADO, P.; ZALBA, B.; CABEZA, L. F. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 31–55, 2010.

GONZO, E. E. Estimating correlations for the effective thermal conductivity of granular materials. **Chemical Engineering Journal**, v. 90, n. 3, p. 299–302, 2002.

GUPTA, M.; YANG, J.; ROY, C. Modelling The Effetive Thermal Conduitivity In Polydispersed Bed Systems: A Unified Approach usin tje Liinear Packing Theory an Unit Cell Model. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 80, p. 830–839, 2002.

GURGEL, J. M.; FILHO, L. S. A.; GRENIER, P. H.; MEUNIER, F. Thermal diffusivity and adsorption kinetics of silica-gel/water. **Adsorption**, v. 7, n. 3, p. 211–219, 2001.

GURGEL, J. M.; KLÜPPEL, R. P. **Thermal conductivity of hydrated silica-gel**

Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal, 1996.

HALLER, M. Y.; CRUICKSHANK, C. A.; STREICHER, W.; HARRISON, S. J.; ANDERSEN, E.; FURBO, S. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes - Review and theoretical comparison. **Solar Energy**, v. 83, n. 10, p. 1847–1860, 2009.

HSU, C. T.; CHENG, P. CLOSURE SCHEMES OF THE MACROSCOPIC ENERGY EQUATION FOR CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN POROUS MEDIA. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 15, n. 6, p. 689–703, 1988.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2015.

KÖMLE, N. I.; HÜTTER, E. S.; FENG, W. J. Thermal conductivity measurements of coarse-grained gravel materials using a hollow cylindrical sensor. **Acta Geotechnica**, v. 5, n. 4, p. 211–223, 2010.

KURAVI, S.; TRAHAN, J.; GOSWAMI, D. Y.; RAHMAN, M. M.; STEFANAKOS, E. K. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 39, n. 4, p. 285–319, 2013.

MARCONDES, F.; MEDEIROS, J. M. DE; GURGEL, J. M. Numerical analysis of natural convection in cavities with variable porosity. **Numerical Heat Transfer; Part A: Applications**, v. 40, n. 4, p. 403–420, 2001.

MIRÓ, L.; GASIA, J.; CABEZA, L. F. Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review. **Applied Energy**, v. 179, p. 284–301, 2016.

MONTEIRO FILHO, A. **Hibridização de gás confinado em depósitos de resíduo sólido urbano com heliotérmica para geração de energia – o caso do Lixão da Estrutural no DF**. 2018. 105 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília – UnB, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2018.

NASCIMENTO, L. N. B. **Uma abordagem sobre energia solar por meio da aprendizagem baseada em projetos**. 2019. 122 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino Tecnológico) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, Campus Centro, Manaus, 2019.

NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. K. I. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **FGV Cadernos EBAPE.BR**, v. x, n. 3, p. 630-651, 2012.

ORTEGA-FERNÁNDEZ, I.; RODRÍGUEZ-ASEGUINOLAZA, J. Thermal energy storage for waste heat recovery in the steelworks: The case study of the REslag project. **Applied Energy**, v. 237, n. 1, p. 708–719, 2019.

PAES, R. M. **Simulação computacional da transferência de calor no escoamento anular de água aquecida por trocador de calor de leito fluidizado borbulhante**.

2019. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

PEREIRA, C. P.; GURGEL, J. M.; KLUPPEL ROGÉRIO P. Aparelho para medição da difusividade térmica de materiais granulares. **Anais do XI COBEM**, p. 261–264, 1991.

PHUEAKPHUM, D.; FUENKAJORN, K. **A rock fills based solar thermal energy storage system for housing**. v. 36, p. 237–243, 2010.

SAHNOUNE, H.; GRENIER, P. H. Mesure de la conductivité thermique d'une zéolithe. **The Chemical Engineering Journal**, v. 40, n. 1, p. 45–54, 1988.

SCHLIPF, D.; SCHICKTANZ, P.; MAIER, H.; SCHNEIDER, G. Using Sand and other Small Grained Materials as Heat Storage Medium in a Packed Bed HTTESS. **Energy Procedia**, v. 69, p. 1029–1038, 2015.

SINGH, H.; SAINI, R. P.; SAINI, J. S. A review on packed bed solar energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 1059–1069, 2010.

TSOTSAS, E.; MARTIN, H. Thermal conductivity of packed beds: A review. **Chemical Engineering and Processing**, v. 22, n. 1, p. 19–37, 1987.

WIKIPÉDIA. Disponível em:
<<https://www.flickr.com/photos/juanjaen/125055912/in/set-72057594101691764/>>.
Acesso em: Julho de 2020.

YIN, H.; DING, J.; JIANG, R.; YANG, X. Thermocline characteristics of molten-salt thermal energy storage in porous packed-bed tank. **Applied Thermal Engineering**, v. 110, p. 855–863, 2017.

ZHANG, N.; WANG, Z. Review of soil thermal conductivity and predictive models. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 117, p. 172–183, 2017.

ZHUANG, X.; XU, X.; LIU, W.; XU, W. LCOE Analysis of Tower Concentrating Solar Power Plants Using Different Molten-Salts for Thermal Energy Storage in China. **Energies**, n. 12, 1394 p. 2019.

APÊNDICES

1.3. APÊNDICE A - Cálculo da porosidade intragranular do leito de brita.

1. Cálculo da porosidade média do leito de brita - $\bar{\epsilon}_b$.

Para calcular a porosidade média do leito de brita, $\bar{\epsilon}_b$, foram colocadas amostras de brita AB-01 em um Becker de 1000 mL (0,122m x ϕ 0,102m), e em seguida foi adicionada água. O volume de água adicionada correspondeu ao volume do vazio no interior do Becker. Utilizando a equação (1) obteve-se o valor da porosidade média do leito, $\bar{\epsilon}_b$. A Tabela 15 apresenta os resultados experimentais.

Tabela 15. Resultados experimentais da medida da porosidade média do leito de brita.

Experimento	Volume de Vazio (ml)	Porosidade do Leito
1	431	0,431
2	454	0,454
3	466	0,466
4	459	0,459
5	399	0,399
6	457	0,457
7	420	0,420
8	467	0,467
Média		0,446
Desvio Padrão		0,025

Fonte: própria.

2. Cálculo da porosidade média do leito com porosidade variável - $\bar{\epsilon}_{bw}$.

Para calcular a porosidade média do leito com o efeito da variação da porosidade próximo a parede, inicialmente foi verificado as dimensões do Becker e calculado as dimensões do cilindro da parte central e a região anular próxima a parede do leito onde a porosidade apresenta variação. A Tabela 16 demonstra as dimensões calculadas.

Tabela 16. Dimensões do Becker, Cilindro da parte central e Região anular próxima a parede do leito.

	Raio, r [cm]	Diâmetro, D[cm]	Área, A [cm ²]	Volume, V [cm ³]
Becker (b)	5,10	10,20	81,71	1000,08
Cilindro (c)	4,25	8,50	56,74	694,50
Região Anular (S)	****	****	24,97	305,58

Fonte: Própria

A espessura da área anular, S é igual ao diâmetro equivalente da partícula, $d_p = 0,86$ cm.

O diâmetro do cilindro D_c é: $D_c = D_b - 2 \times (S) = 10,2 - 2 \times 0,85 = 8,5$ cm.

O cálculo da porosidade $\bar{\epsilon}_{bw}$, foi realizado por meio da substituição da equação (2) na equação (3) em seguida realizada a integração numérica pela regra dos trapézios simples, tomando os limites de integração a espessura da região anular S. Os resultados calculados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Resultado do cálculo da porosidade por integração numérica.

Coordenada radial, r(w)[mm]	Distância da Parede, w(mm) [w=r _b -r(w)]	$\epsilon(w)$ [Equação 3]*	Integração [Equação 4]
51,00	0,00	0,98	
50,50	0,50	0,85	0,46
50,00	1,00	0,74	0,40
49,50	1,50	0,66	0,35
49,00	2,00	0,60	0,32
48,50	2,50	0,56	0,29
48,00	3,00	0,52	0,27
47,50	3,50	0,50	0,25
47,00	4,00	0,47	0,24
46,50	4,50	0,46	0,23
46,00	5,00	0,45	0,23
45,50	5,50	0,44	0,22
45,00	6,00	0,43	0,22
44,50	6,50	0,43	0,21
44,00	7,00	0,42	0,21
43,50	7,50	0,42	0,21
43,00	8,00	0,42	0,21
42,50	8,50	0,42	0,21
SOMA			4,54
$\bar{\epsilon}_{bw}$			0,534

*Parâmetros utilizados na equação: C1=1,4; N1=5; $d_p=0,00918$ m; $\epsilon_\infty=0,41$.

Fonte: Própria.

3. Cálculo da porosidade do leito de brita - ε_b .

A porosidade do leito de brita é igual a porosidade da parte central, ε_c , que é calculada pela média ponderada de $\bar{\varepsilon}_b$ e $\bar{\varepsilon}_{bw}$. Com segue:

$$\varepsilon_c = \frac{(\bar{\varepsilon}_b \times A_b) - (\bar{\varepsilon}_{bw} \times A_S)}{A_c} = \frac{(0,446 \times 81,71) - (0,534 \times 24,97)}{56,74} = 0,407.$$

O valor da porosidade do leito de brita é **0,41 ± 0,02**.

1.4. APÊNDICE B – Resultados obtidos por termoanálise.

A curva DSC obtida pelo método descrito na seção 0, e a Tabela 18 com a variação de c_p na faixa de 25 a 30°C (Figura 46).

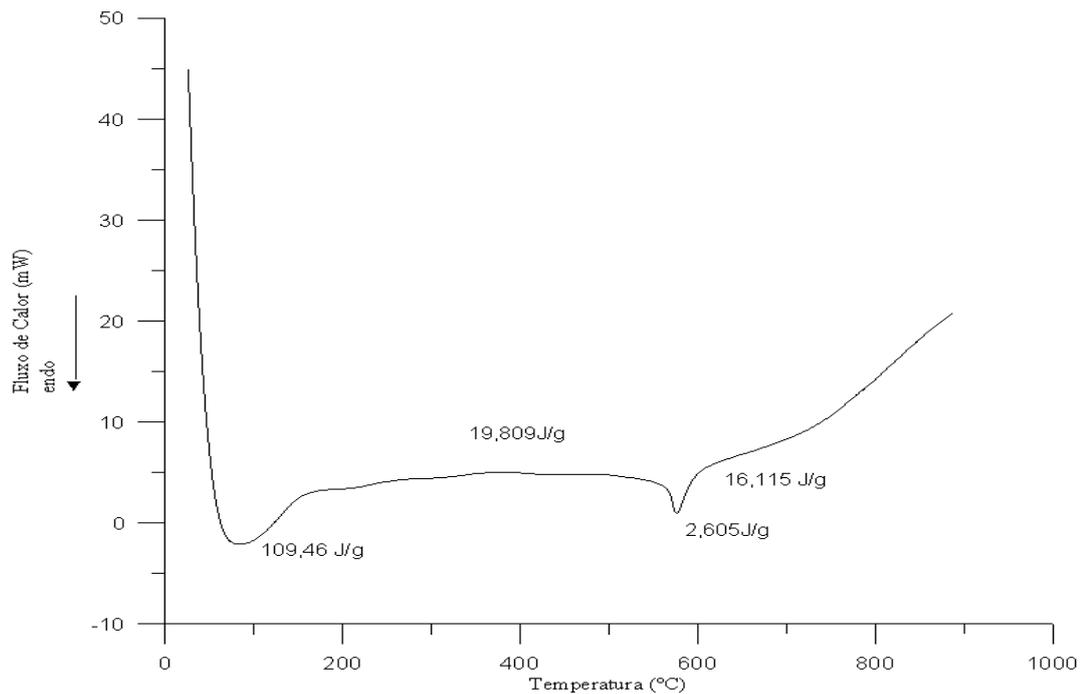


Figura 46. Curva DSC da amostra de brita (AB-01). Taxa de aquecimento de 20°C/min; vazão do gás de 50ml/min; massa da amostra de 64,360g.

Fonte: Própria.

Tabela 18. Calor específico da amostra de brita AB-01, na faixa de temperatura de 26°C a 30°C

Temperatura(°C)	Cp (J/kgK)
26,0	518,12
27,0	801,67
28,0	900,17
29,0	940,64
30,0	949,70
Média	822,06

Fonte: Própria.

1.5. APÊNDICE C – Discretização da equação unidimensional de Fourier em coordenadas cilíndricas.

A seguir é mostrada a solução da Equação (23) por diferenças finitas método explícito.

Inicialmente tomando o tempo total, $t = p.\Delta t$ e o espaço discretizado, $r = m\Delta r$. Sabendo-se que Δt é limitado pelo critério de estabilidade e que p e m são o passo de tempo e o número de divisão no espaço.

Na Equação (23) a derivada espacial de segunda ordem a aproximação da forma discretizada será por diferença central, para a derivada espacial de primeira ordem a forma discretizada, será a aproximação por diferenças descendente ou atrasada. Na derivada em relação a tempo a aproximação será por diferença adiantada (INCROPERA, 2015).

A forma discretizada da equação é:

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right| = \frac{T_{m+1}^p + T_{m-1}^p - 2T_m^p}{\Delta r^2} \quad (33)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right| = \frac{T_m^p - T_{m-1}^p}{\Delta r} \quad (34)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right| = \frac{T_m^{p+1} - T_m^p}{\Delta t} \quad (35)$$

Substituindo as equações (33), (34) e (35) na equação (22) obtém-se a equação discretizada (25):

$$T_j^i = Fo \left(1 - \frac{\Delta r}{r(j)} \right) T_{j-1}^{i-1} + \left(Fo \left(-2 + \frac{\Delta r}{r(j)} \right) + 1 \right) T_j^{i-1} + Fo T_{j+1}^{i-1} \quad (25)$$

Onde Fo é o número adimensional de Fourier da malha, igual a:

$$Fo = \alpha \left(\frac{\Delta t}{\Delta r^2} \right) \quad (36)$$

1.6. APÊNDICE D – Algoritmo da equação de calor para coordenadas cilíndricas unidirecional por diferenças finitas explícita.

A seguir é apresentado o algoritmo que foi implementado no programa MATLAB. R 2016a.

% Algoritmo para resolução da 2ª Lei de Fourier por diferenças finitas explícito.

% Determinação do comprimento radial total do espaço da amostra

RI=0.011573; % Raio interno (m)

RE=0.038829; % Raio Externo(m)

RT=RE-RI% Espaço de confinamento da amostra(m)

% Determinação temporal da malha

ttotal=1200; % Tempo Total do Experimento

deltat=5; % Incremento de tempo

p=ttotal/deltat% passo de tempo

% Determinação espacial da malha

M=4; % Quantidade de nós

m=M-1; % Número de divisões do espaço de confinamento

deltar=RT/m % incremento do espaço

% Caracterização Térmica da Amostra

alfa=2.2636e-07 % difusividade térmica(m²/s)

Fo=(alfa*deltat)/(deltar²) % Número de Fourier

% Condição Inicial

To=30.5013% Temperatura Inicial

% Condição de Contorno

TE= TEXP % Temperaturas Experimentais na Posição R1 e R4.

TE2= TEXP2 % Temperaturas Experimentais na Posição R2.

% Critério de estabilidade

deltato=(deltar^2)/(2*alfa)

for i=1:p

for j=1 r(i,j)=RI;

end

for j=2:M

r(i,j)=RI+(deltar*(j-1));

end

end

for i=1:p

for j=1

T(i,j)=TE(i,1);

end

for j=2:M-1

T(i,j)=To;

end

for j=M

T(i,j)=TE(i,3);

end

end

for i=2:p

for j=2:M-1

T(i,j)=Fo*T(i-1,j+1)+(Fo*(-2+(deltar/r(i,j)))+1)*T(i-1,j)+(Fo*(1-(deltar/r(i,j))))*T(i-,j1);

End

%Determinação da Erro Quadrático Médio e do Desvio Padrão

T1=T([1:end],[2]); % Resíduo

RESIDUO=(T1-TE2).^2; % Quadrado do Resíduo

```
SRESIDUO=sum(RESIDUO) % Somatório do Quadrado do Resíduo
```

```
RESIDUOMEDIO=SRESIDUO/(p-1) % Resíduo Médio
```

```
DP=sqrt(RESIDUOMEDIO) % Desvio Padrão do Resíduo
```

```
plot(T) % Plotar a Curva da Temperatura T(i,2)
```

```
holdon
```

```
plot(TE2,'k')
```

```
% Plotar a Curva da Temperatura Experimental na posição R2.
```