



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

CARLOS ROBERTO NUNES DE SOUZA

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO GESSO ( $\text{CaSO}_4$   
 $0,5\text{H}_2\text{O}$ ) EM FUNÇÃO DE SUA POROSIDADE**

Juazeiro – BA  
2015



**PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS  
PGCM - UNIVASF**

**CARLOS ROBERTO NUNES DE SOUZA**

**ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO GESSO ( $\text{CaSO}_4$   
 $0,5\text{H}_2\text{O}$ ) EM FUNÇÃO DE SUA POROSIDADE**

Dissertação apresentada a Pós-graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Alan Christie da Silva Dantas  
Co-orientador: Prof. MSc. José Pereira Alencar Júnior.

Juazeiro – BA  
2015

	Souza, Carlos Roberto Nunes de
* Cutter	Estudo da condutividade térmica do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) em função de sua porosidade/Carlos Roberto Nunes de Souza. -- Juazeiro, 2015.
	xx ; 89f.43: il. 29 cm.
	Dissertação de mestrado (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus, Juazeiro, 2015.
	Orientador (a): Prof. Dr. Alan Christie da Silva Dantas, Co-orientador: Prof. MSc. José Pereira Alencar Júnior.
	1.Gesso. 2. Condutividade térmica. 3. Fio quente. I. Título. II. Universidade Federal do Vale do São Francisco
	* CDD

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

CARLOS ROBERTO NUNES DE SOUZA

ESTUDO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO GESSO ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) EM FUNÇÃO DE SUA POROSIDADE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências dos Materiais, pela Universidade Federal do Vale do São Francisco.

---

Alan Christie da Silva Dantas, Doutor, UNIVASF.

---

Nikifor Rakov Gomez, Doutor, UNIVASF.

---

Claudemiro de Lima Júnior, Doutor, UPE.

Juazeiro, 30 de Novembro de 2015

Dedico este trabalho a minha prima, Anna Patrícia (em memória), seu sorriso e sua alegria de viver estarão sempre conosco.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me fortalecer em momentos difíceis, por me guiar, dar saúde e me mostrar o caminho a ser seguido em todos os momentos.

Aos meus pais Carlos Roberto de Sousa Santos e Maria das Graças Nunes pela dedicação, amor, paciência, compreensão e incentivo, e por abdicar dos seus próprios sonhos para realizar essa conquista. Sei que sem vocês não seria possível.

Aos meus orientadores, Prof. Alan C. S. Dantas e Prof. José P. Alencar Júnior, pela orientação, paciência, amizade, dedicação, companheirismo e principalmente pelos ensinamentos transmitidos, sem os quais, este trabalho não teria sido possível.

A minha irmã Janylle Nunes e meu cunhado Edimar Cavalcanti pela simplicidade, carinho e companheirismo em todos os momentos da minha vida, e um agradecimento a toda minha família em especial aos meus tios e tias por me apoiar e acreditar que tudo seria possível.

Agradeço aos professores do colegiado de engenharia mecânica da Universidade Federal do Vale do São Francisco, professor Luiz Mariano pelo apoio e incentivo durante a pesquisa, professor Nelson Olivier por disponibilizar o laboratório de ensaios de materiais para execução dos testes e ao professor José de Castro pela ajuda com os equipamentos de medição.

A todos os professores do IPCM, Alan, Helinando, Nikifor, Wagner, Roberto Jefferson e Aníbal, pelos ensinamentos.

Aos técnicos de laboratório Francimário e Taasiel, pela ajuda durante as atividades práticas.

Agradeço aos meus amigos de mestrado Adriana, Bruna, Thamásia, Jefferson, Patrícia, Fábria, Robson, Jorge, Paulo Henrique, André e Francisco pelo carinho e incentivo e os grandes momentos que vivenciamos nessa jornada e aos amigos de fora da Universidade pelo incentivo, força e conseguir me incentivar que todo esse trabalho seria possível. Agradecimento a todos os amigos que fiz durante essa jornada.

"Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares." Js 1:9

Nunes, C.R.S. **Estudo da condutividade térmica do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ ) em função de sua porosidade**. 2015. 89p. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais) – pós-graduação em ciência dos materiais – PGCM, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2015.

## RESUMO

O gesso é um material amplamente utilizado na construção civil que apresenta baixa condutividade térmica devido a sua natureza química e estrutural. O aumento da porosidade tende a promover uma diminuição da condutividade térmica dos corpos potencializando este material para aplicações de isolamento térmico. Este trabalho tem como objetivo a análise numérica e experimental da influencia da porosidade na condutividade térmica de blocos de gesso medida a partir do método do fio quente. Um modelo teórico numérico foi desenvolvido utilizando o método das diferenças finitas com o auxílio da linguagem de programação FORTRAN 90. Os ensaios experimentais foram realizados em corpos com diferentes porosidades onde a porosidade dos corpos foi controlada a partir da variação da quantidade de água utilizada na produção dos blocos (razões mássicas água/gesso iguais a 0,5, 0,6 e 0,7), e a partir da adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ). Uma variação de 20% da porosidade promoveu uma redução de 50% da condutividade térmica, de modo que amostras com 44% porosidade apresentaram uma condutividade térmica de  $0,91 \pm 0,02 \text{ W/mK}$  enquanto que amostras com 64% porosidade apresentaram um valor de  $0,45 \pm 0,01 \text{ W/mK}$ .

Palavras-chave: gesso, condutividade térmica, método do fio quente, diferenças finitas

Nunes, C.R.S. **Study of the thermal conductivity of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{H}_2\text{O}$ ) due to its porosity.** 2015. 89p. Dissertation (Master's degree in materials science) – postgraduate in materials science – PGCM, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2015.

## ABSTRACT

Gypsum is a material widely used in civil construction that has a low thermal conductivity due to its chemical and structural nature. The increased porosity tends to promote a decrease in thermal conductivity of this material bodies for enhancing thermal insulation applications. This work aims to numerical and experimental analysis of the influence of porosity on thermal conductivity of gypsum blocks far from the hot wire method. A numerical theoretical model was developed using the finite difference method with the aid of the programming language Fortran 90. Experimental tests were carried out on bodies having different porosity where the porosity of the bodies is controlled from the variation of the amount of water used in the production Blocks (mass ratios water / gypsum equal to 0.5, 0.6 and 0.7) and from the addition of sodium bicarbonate ( $\text{NaHCO}_3$ ). A variation of 20% porosity promoted a 50% reduction in thermal conductivity, so that with 44% porosity samples exhibited a thermal conductivity of  $0.91 \pm 0.02 \text{ W / m.K}$  while that with 64% porosity samples exhibited a value  $0.45 \pm 0.01 \text{ W / m.K}$ .

Keywords: gypsum, thermal conductivity, hot wire method, finite difference.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: variedades de gipsita extraídas do gipso para fabricação de gesso .....	16
Figura 2.2: reserva e produção de gipsita .....	18
Figura 2.3: principais dados referentes à produção, importação, exportação e consumo de gipsita no Brasil no ano de 2013.....	19
Figura 2.4: fluxograma do processo de beneficiamento da gipsita.....	21
Figura 2.5: autoclave para a produção de gesso- $\alpha$ . .....	22
Figura 2.6: morfologia dos cristais do gesso- $\beta$ e do gesso $\alpha$ .....	22
Figura 2.7: Etapas de desidratação da gipsita para diferentes temperaturas. ....	23
Figura 2.8: estrutura cristalina da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).....	25
Figura 2.9: microscopia eletrônica de varredura do gesso- $\beta$ .....	25
Figura 2.10: esquema ilustrativo do processo de hidratação do gesso.....	27
Figura 2.11: dureza do gesso- $\beta$ (úmido e seco) em função da porosidade.....	28
Figura 2.12: gráfico da temperatura em função do logaritmo natural do tempo .....	31
Figura 2.13: esquema ilustrativo de ensaio utilizando o método do fio quente. ....	32
Figura 2.14: comparação entre as curvas teórica e real do método do fio quente ....	33
Figura 2.15: faixa de condutividade térmica para diferentes estados da matéria.....	40
Figura 2.16: Comportamento da condutividade térmica de alguns materiais cerâmicos em função da temperatura. ....	42
Figura 2.17: variação da condutividade térmica do gesso em pó em função da temperatura. ....	45
Figura 2.18: variação da condutividade térmica dos corpos de prova de gesso em formato cilíndrico em função da temperatura. ....	46
Figura 2.19: Malha utilizada na condução bidimensional com aproximação por diferenças finitas. ....	48
Figura 2.20: ilustração do método ADI. ....	49
Figura 2.21: ilustração da solução pelo método ADI. ....	50

Figura 3.1: corpo de prova produzido para ensaio com o método do fio quente.....	53
Figura 3.2: esquema ilustrativo da bancada experimental. ....	54
Figura 3.3: bancada experimental utilizada para os ensaios com o método do fio quente. ....	54
Figura 3.4: esquema ilustrativo das posições dos canais na superfície do corpo de prova .....	55
Figura 3.5: modelo físico dos corpos de prova durante o teste com o método do fio quente .....	58
Figura 3.7: modelo utilizado para dedução das equações de diferenças finitas.....	58
Figura 4.1: porosidade média em função da razão água/gesso utilizada.....	61
Figura 4.2: Morfologia da superfície das cerâmicas de gesso bi hidratadas obtidas com diferentes relações água/gesso e com 0% e 1 %de NaHCO <sub>3</sub> . ....	62
Figura 4.3: curvas teóricas e reais da temperatura como uma função de tempo.....	63
Figura 4.4: condutividade térmica média em função da porosidade média e reta que representa a relação entre a condutividade térmica media e porosidade média. ....	64
Figura 4.5: comparação dos valores de condutividade térmica, obtidos através do fio quente com dados da literatura. ....	66
Figura 4.6: gráfico da tensão de compressão x porosidade para os corpos produzidos.....	67
Figura 4.7: perfil gerado com diferentes malhas. ....	69
Figura 4.8: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 50% e 0% de NaHCO <sub>3</sub> . ....	69
Figura 4.9: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 60% e 0% de NaHCO <sub>3</sub> . ....	70
Figura 4.10: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 70% e 0% de NaHCO <sub>3</sub> . ....	70

Figura 4.11: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 50% e 1% de NaHCO <sub>3</sub> . .....	71
Figura 4.12: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 60% e 1% de NaHCO <sub>3</sub> . .....	71
Figura 4.13: Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 70% e 1% de NaHCO <sub>3</sub> . .....	72
Figura 4.14: posicionamento dos termopares para coleta de dados de temperatura em diferentes pontos dos corpos de prova.....	74
Figura 4.15: comparação entre os valores médios de temperaturas experimentais e numéricos nos pontos 1, 2 e 3, para as amostras com razão água/gesso de 70% e 1% de NaHCO <sub>3</sub> . .....	75
Figura 4.16: comparação entre os valores médios de temperaturas experimentais e numéricos nos pontos 1, 2 e 3, para as amostras com razão água/gesso de 50% e 0% de NaHCO <sub>3</sub> . .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: análise química dos óxidos (% em massa), presentes na gipsita.....	20
Tabela 2.2: composição química teórica da gipsita.....	24
Tabela 2.3: propriedades das diversas formas do sulfato de cálcio. ....	26
Tabela 2.4: Propriedades mecânicas para o gesso de construção. ....	29
Tabela 2.5: condutividade térmica do gesso em diferentes aplicações.....	45
Tabela 2.6: condutividade térmica do compósito gesso-celulose.....	46
Tabela 3.1: razões mássicas utilizadas para a produção dos corpos de prova.....	52
Tabela 3.2: parâmetros dos ensaios de medição de condutividade térmica. ....	56
Tabela 4.1: valores médios de porosidade e de densidade média para cada razão água/gesso.....	60
Tabela 4.2: maiores valores de porosidade para cada razão água/gesso utilizada ..	62
Tabela 4.3: Valores médios de condutividade térmica para cada razão água/gesso. .....	64
Tabela 4.4: Resistências à compressão e porosidade dos corpos porosos obtidos em todas as relações água/gesso.....	66
Tabela 4.5: temperaturas médias dos selecionados nas amostras com razão água/gesso de 70% e 1% de $\text{NaHCO}_3$ e razão água/gesso de 50% sem adição de bicarbonato de sódio. .....	74

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO	14
<b>1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1 PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DO GESSO	16
2.1.1 ORIGEM E FORMAÇÃO	16
2.1.2 EXPLORAÇÃO MUNDIAL E BRASILEIRA	17
2.1.3 BENEFICIAMENTO	21
2.1.4 MICROESTRUTURA	24
2.1.5 PROPRIEDADES	26
2.2 O MÉTODO DO FIO QUENTE	30
2.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	30
2.2.2 FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DO FIO QUENTE	31
2.2.3 TÉCNICA PADRÃO DO FIO QUENTE (CRUZ DE MEDIÇÃO)	34
2.2.4 MODELO MATEMÁTICO DO MÉTODO DO FIO QUENTE	35
2.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	39
2.3.1 IMPORTÂNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA	39
2.3.2 A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS SÓLIDOS	40
2.3.3 MATERIAIS CERÂMICOS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO	43
2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS	46
2.4.1 MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS	46
2.4.2 O MÉTODO ADI (ALTERNATING DIRECTION IMPLICITE)	48
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
3.1.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	51
3.1.2 MONTAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PELO FIO QUENTE	53
3.1.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS	55
3.1.4 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE	56
3.2 MODELAGEM NUMÉRICA	57
3.2.1 MODELO FÍSICO	57
3.2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	59

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>60</b>
4.1	ANÁLISE DA DENSIDADE DAS AMOSTRAS.....	60
4.2	ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA .....	63
4.3	PERFIS DE TEMPERATURA .....	68
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Cerca de 20% das reservas mundiais de gipsita encontram-se no Brasil (LYRA, 2008) onde Pernambuco é o principal estado produtor de gipsita do Brasil, sendo responsável, em 2013, por 87,6% da produção nacional deste minério (PERES, 2008). O gesso apresenta baixa condutividade térmica, devido à presença de grandes vazios nos espaços intercristalinos, chegando a ser de 3 a 4 vezes menos condutor do que o concreto.

A resistência mecânica e a rigidez do corpo rígido de gesso dependem do encadeamento dos cristais dihidratados e da porosidade resultante. A quantidade de água utilizada tem influência direta nestas propriedades devido ao aumento do tempo de início e final da pega (PERES, 2008). A presença de porosidade na microestrutura de blocos rígidos de gesso está relacionada em geral com a quantidade de água, uma vez que quanto maior a quantidade de água, maior será a quantidade de vazios (poros) deixados pela água evaporada na secagem. O aumento dos poros diminui as propriedades mecânicas como resistência a compressão, flexão e dureza, entretanto, diminuem a condutividade térmica do material já que o ar, que fica nos poros, possui baixa condutividade térmica (0,023 W/m.K), constituindo um elemento muito resistente à passagem de calor. SILVA e DANTAS, (2012) utilizaram o bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) para produção de corpos de prova de gesso com porosidade aumentada e propriedades mecânicas aceitáveis.

O método do fio quente é um interessante método para avaliação da condutividade térmica dos corpos de gesso em função da variação da porosidade. Este método consiste na passagem de uma corrente elétrica através de uma resistência elétrica que funciona como fio quente. Este método tem sido amplamente utilizado para a avaliação da condutividade térmica de materiais cerâmicos porosos como gesso puro, concreto refratário e composto de gesso e fibra vegetal (SANTOS, 2005; SANTOS, 2002; SANTOS, 1988; LIMA, 2005). Além disso, a técnica do fio quente apresenta vantagens com relação a outros métodos, pois, nesta técnica de medida, é eliminado o conceito de “temperatura média” entre a face quente e a face fria de uma amostra utilizada nos cálculos dos métodos calorimétricos, uma vez que o cálculo da condutividade é feito numa determinada

temperatura fixa. O método do fio quente utiliza um gradiente de temperatura através da amostra muito baixo, o que é sem dúvida outra virtude deste método uma vez que um método ideal de medida de condutividade térmica seria aquele capaz de medir essa propriedade segundo um gradiente de temperatura zero através da amostra. Além disso, o método do fio quente é o único capaz de medir condutividades térmicas desde a temperatura ambiente até altas temperaturas, o que se demonstra ser extremamente vantajoso, principalmente, no caso de materiais cerâmicos refratários e isolantes (SANTOS, 2005).

Para auxiliar o estudo da influência da porosidade sobre a condutividade térmica, foi necessário determinar os perfis de temperatura através do método numérico de diferenças finitas. Optou-se por esta técnica, pois, ela é muito difundida na solução de problemas de condução de calor, além de, de sua fácil aplicação. Com esse objetivo foi elaborado um problema de condução de calor bidimensional, sem geração de calor, em regime transiente e sujeito a convecção natural, baseado nos testes utilizando o método fio quente.

Para a solução do conjunto de equações de diferenças finitas para o modelo físico adotado, foi utilizado o método ADI (*Alternating direction implicit*). Através desse método, um problema bi ou tridimensional é resolvido com a solução de dois ou três problemas unidimensionais respectivamente, ou seja, as equações de diferenças finitas são resolvidas em direções alternadas.

Utilizando o método do fio quente, este trabalho avaliou a influência da porosidade sobre a condutividade térmica dos corpos de gesso. A porosidade das amostras foi alterada a partir da variação da relação água/gesso e da adição de bicarbonato de sódio. O método é aplicável até à temperatura de 1250 °C, para materiais cuja condutividade térmica seja menor a 1,5 W/m.K

## 1.1 OBJETIVO

Este projeto tem como objetivo a avaliação da condutividade térmica de corpos do gesso em função da sua porosidade.

### 1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. A Produção de cerâmicas monolíticas a base de gesso com resistência mecânica, solubilidade, e propriedades térmicas adequadas, obtidas a partir adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ );
2. Dimensionamento e construção do equipamento para realização dos testes com o método do fio quente;
3. Medição da condutividade térmica dos corpos de prova com porosidade alterada pela adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ );
4. A produção de cerâmicas porosas com propriedades específicas para uso como isolantes térmicos.
5. Modelagem computacional da condução de calor nos corpos de prova produzidos.

Com o alcance destas metas, pretendemos criar uma nova linha de pesquisa duradoura, com um amplo potencial de geração de inovação e tecnologias diretamente aplicáveis à região circunvizinha da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF).

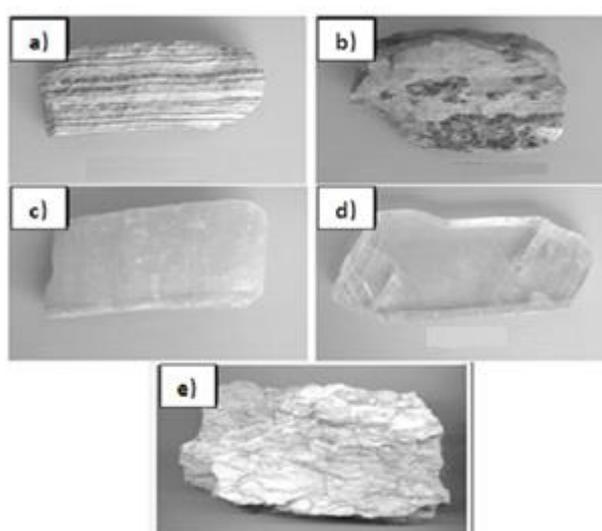
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA PRODUÇÃO E PROPRIEDADES DO GESSO

### 2.1.1 ORIGEM E FORMAÇÃO

Obtido através do processo de calcinação do mineral gipsita ou sulfato de cálcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), o sulfato de cálcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) ou popularmente conhecido como gesso é originado de rochas sedimentares chamadas gipso (Antunes, 1999).

A formação do gipso está diretamente ligada a reservatórios naturais formados por águas oriundas de antigos oceanos com alta concentração de sais de sulfato de cálcio. O clima quente e seco ao qual estavam sujeitos tais reservatórios influenciou diretamente os processos de evaporação e sedimentação de forma a acelera-los (Baltar *et al.* 2005; Canut, 2006). Além do sulfato de cálcio algumas impurezas como: sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos e magnésio, são encontradas.

A qualidade do gipso é medida em função do teor de gipsita contido na rocha. As jazidas das quais é extraída a gipsita são compostas por camadas de minérios como a anidrita, carbonatos, quartzo e argila entre outros (Baltar *et al.* 2005; Canut, 2006). Na figura 2.1 podem ser vistas algumas variedades da gipsita que são empregadas na produção de gesso.



**Figura 2.1:** variedades de gipsita extraídas do gipso para fabricação de gesso (a) Cocadinha (b) Johnson e Estrelinha (c) Alabastro d) Selenita e (e) Anidrita. Baltar *et al.* 2006 e Canut, 2006.

Outro produto resultante do beneficiamento da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), além do gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaSO}_4$ ), é a anidrita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \xi\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CaSO}_4$ ). A composição química desses minérios diferencia-se apenas quanto à proporção de água de hidratação. Isto permite a gipsita e a anidrita do tipo II e tipo III, tornarem-se compostos instáveis, ou seja, elas podem ter sua composição alterada em função das condições de pressão e temperatura as quais estão submetidas. Com isso, a gipsita presente na superfície terrestre pode perder água e então tornar-se um material anidro (Baltar *et al.* 2005).

O processo de hidratação também pode ocorrer, quando a anidrita é localizada em áreas mais profundas. Este fato é resultado da aproximação da anidrita em relação à superfície devido a fenômenos geológicos com erosão do solo e também de movimentos tectônicos. A reidratação do material anidro produz um novo minério, denominado de gipsita secundária, esta possui estrutura cristalina diferente da anidrita como também da gipsita original (Baltar *et al.* 2005).

A gipsita é uma matéria prima largamente empregada na indústria. Isto se deve ao fato de ser um minério com abundantes reservas aliadas à facilidade de hidratação e desidratação. Outro fator que contribui fortemente para o emprego do sulfato de cálcio como matéria prima é o seu beneficiamento. Este processo pode ser descrito basicamente em duas etapas, a primeira consiste na extração da gipsita, seguida pelo tratamento térmico do minério, resultando em gesso ou sulfato de cálcio hemidratado, que ao ser misturado com água sofre reidratação e retoma as características da gipsita.

### **2.1.2 EXPLORAÇÃO MUNDIAL E BRASILEIRA**

Segundo Oliveira *et al.* (2012), as reservas mundiais de gipsita contam com 2.360 milhões de toneladas do respectivo minério. De acordo com Queiroz (2013) a produção mundial gipsita em 2013 foi de 160 milhões de toneladas (Mt), isso representa um aumento de 5,3% em relação ao ano de 2012. Apesar de possuir a segunda maior reserva de gipsita do mundo, o Brasil ainda não tem uma participação expressiva na produção mundial de gipsita, contribuindo com apenas

2,1% (3,3 Mt) do total mundial. As reservas e a produção por país podem ser observadas na figura 2.2. A China é o maior produtor de gipsita do globo, com uma produção em 2013 de 50 (Mt) o que representa 31,3% da produção Mundial. O Brasil detém o título de maior produtor da América do Sul, porém, em uma escala mundial encontra-se apenas na 11<sup>a</sup> posição.

Discriminação Países	Reservas (10 <sup>3</sup> t)	Produção (10 <sup>3</sup> t)		
	2013 <sup>(p)</sup>	2012 <sup>(p)</sup>	2013 <sup>(p)</sup>	(%)
<b>Brasil</b>	291.807	<b>3.750</b>	<b>3.330</b>	<b>2,1</b>
Arábia Saudita	nd	2.500	2.500	1,6
Austrália	nd	2.500	3.000	1,9
China	nd	48.000	50.000	31,3
França	nd	2.300	2.300	1,4
Espanha	nd	7.100	7.100	4,4
Estados Unidos da América	700.000	15.800	16.300	10,2
Índia	69.000	2.750	3.600	2,3
Irã	nd	13.000	14.000	8,8
Itália	nd	4.130	4.100	2,6
Japão	nd	5.500	5.500	3,4
México	nd	4.690	5.000	3,1
Rússia	nd	3.150	6.000	3,8
Tailândia	nd	9.000	9.000	5,6
Turquia	nd	2.100	2.000	1,3
Outros países	nd	25.730	26.270	16,4
<b>TOTAL</b>	<b>nd</b>	<b>152.000</b>	<b>160.000</b>	<b>100,0</b>

(p) dado preliminar; (r) revisado; (nd) dado não disponível.

**Figura 2.2:** reserva e produção de gipsita Fonte: Queiroz (2013).

Mesmo sendo um grande produtor de gipsita o Brasil em 2013 importou 243.916 t de gipsita e seus derivados, quantidade 57,6% maior quando comparada com as importações de 2012 (154.774 t) (QUEIROZ, 2013). Basicamente as importações relativas à gipsita, gesso e seus derivados são compostas por produtos manufaturados. Nesta situação os principais fornecedores de produtos manufaturados para o Brasil são: a Espanha que detém 52% do valor total das importações, Argentina (22%), México (14%), Turquia (4%) e China (3%).

O ano de 2013 assim como nas importações também apresentou um aumento de 15,2% em relação ao ano de 2012, no que se refere ao valor das exportações brasileiras de gipsita e seus derivados (QUEIROZ, 2013). Mesmo com esse crescimento, o total de gipsita e seus derivados exportados foi de 31.626 t, essa quantidade chega a representar nem 1% da produção nacional. O principal destino das exportações de manufaturados foi o Paraguai (86%), Equador (6%), Colômbia (3%), Venezuela (1%) e Nigéria (1%) (QUEIROZ, 2013).

O consumo de gesso por habitante no Brasil gira entorna de 7,0 kg/habitante-ano, o que considerado baixo quando comparado com os números de outros países. Na Argentina, por exemplo, o consumo anual de gesso per capita é de 20,0 kg/habitante-ano, já no Chile 40,0 kg/habitante-ano, para o Japão 80,0 kg/habitante-ano e os Estados Unidos com 90,0 kg/habitante-ano (Barros *et al.* 2006). O setor da indústria brasileira com maior consumo de gesso é a construção civil (52%), além desse ramo o sulfato de cálcio hemidratado é empregado na indústria de joias, cerâmicas, automotiva, na medicina e odontologia, entre outras (RIBEIRO, 2006). A figura 2.3 os principais dados referentes à produção, importação, exportação e consumo de gipsita no Brasil no ano de 2013.

Discriminação		Unidade	2011 <sup>(r)</sup>	2012 <sup>(r)</sup>	2013 <sup>(p)</sup>
Produção	Gipsita (ROM)	(t)	3.228.931	3.749.860	3.332.991
Importação	Bens Primários	(t)	78.506	69.604	114.241
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	952	852	1.379
Manufaturados		(t)	132.604	85.170	129.675
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	31.327	22.752	31.705
Exportação	Bens Primários	(t)	1	16.150	1
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	5	439	10
Manufaturados		(t)	4.652	6.269	31.625
		(10 <sup>3</sup> US\$-FOB)	1.228	1.365	2.069
Consumo Aparente Gipsita <sup>(1)</sup>	Gipsita (ROM)	(t)	3.435.388	3.882.215	3.545.281
Preços dos Manufaturados	Imp./Exp. <sup>(2)</sup>	(US\$/t)	236,20/264,0 0	267,10/217,7 0	244,50/65,42

(1) Bens primários: produção + importação – exportação; (2) preço médio anual dos manufaturados – importação/exportação; (p) dados preliminares passíveis de modificação; (r) revisado.

**Figura 2.3:** principais dados referentes à produção, importação, exportação e consumo de gipsita no Brasil no ano de 2013. Fonte: Queiroz (2013).

Os principais depósitos nacionais associados às bacias sedimentares são Amazônica, Parnaíba, Potiguar, Araripe e Recôncavo. A maior parte das reservas brasileiras de gipsita (96%) está dividida entre os Estados da Bahia (43%), Pará (35%) de Pernambuco (18%). Os 4% restantes estão distribuídos entre os estados do Maranhão (2,7%), Tocantins (0,6%), Ceará (0,3%), Piauí (0,2%) e Amazonas (0,1%).

De acordo com Queiroz (2013) Pernambuco é o principal produtor de gipsita no Brasil, sendo responsável em 2013, por 87,6% da produção nacional. A produção

neste está concentrada na região denominada de polo Gesseiro do Araripe, localizada no sertão do estado do Araripe a 700 km de distância da capital Recife. O polo gesseiro é formado pelas cidades de Araripina, Bodocó, Exú, Ipubi, Ouricuri e Trindade, sendo a primeira a ter a liderança da região, pois, detém a maior parte da extração como também do beneficiamento do minério da gipsita (Barros, 2006 e Bastos *et al.* 2005). Outra característica do polo gesseiro do Araripe é a qualidade da gipsita extraída em suas reservas, chegando a ser considerada a de melhor qualidade no mundo. Este fato é decorrente de que a gipsita extraída possui teor de sulfato de cálcio que varia entre 88 e 98% e apresenta baixas proporções de impurezas. (Aranha e Oliveira, 2002; Barros, 2006; Bastos *et al.* 2005). A análise química dos óxidos presentes na gipsita pode ser vista na tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** análise química dos óxidos (% em massa), presentes na gipsita. Fonte: Aranha e Oliveira (2002).

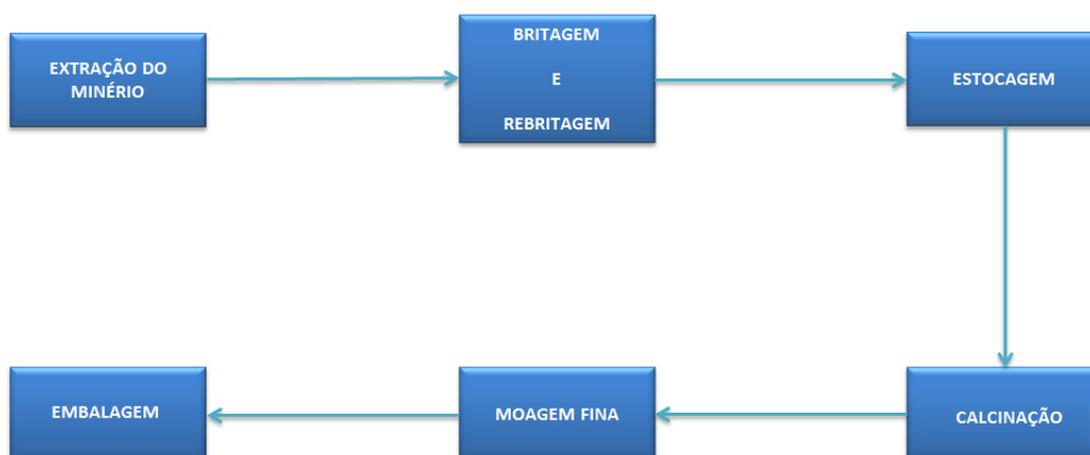
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
0,3	0,1	0,04	< 0,1	41,9	0,02	< 0,01	< 0,1	< 0,01	0,02

O polo gesseiro do Araripe fornece ao mercado três subprodutos oriundos de suas minas: a gipsita, o gesso- $\alpha$  e o gesso- $\beta$ . Sendo a indústria da construção civil o destino de quase toda produção do polo gesseiro, a qual faz uso do gesso- $\beta$ , este fato aliado ao baixo custo de produção do hemidrato- $\beta$ , faz com que grande parte das empresas do polo gesseiro do Araripe concentrem sua produção neste minério. Além de apresentar qualidade superior em relação ao gesso- $\beta$ , o gesso- $\alpha$  também possui um custo de produção de pelo menos dez vezes maior quando comparado ao hemidrato- $\beta$ . Dessa forma o interesse das fábricas em produzir o gesso- $\alpha$  é limitado. O gesso- $\alpha$  é empregado na área médico-odontológica.

Cerca de 650 empresas operam atualmente no polo gesseiro do Araripe. Estas atuam na mineração, calcinação e produção de blocos e placas de gesso, além do gesso para aplicação odontológica. Devido às suas importantes características econômicas e geográficas, o polo gesseiro do Araripe vem sendo classificado como um Arranjo Produtivo Local (APL) nos domínios governamentais e institucionais, gerando em torno de 20 mil empregos diretos e 60 mil empregos indiretos, sendo visto como uma base econômica de forte influência nacional.

### 2.1.3 BENEFICIAMENTO

Podem-se obter diferentes subprodutos oriundos do gesso natural, para isso, é necessário submeter à gipsita a quatro etapas básicas de produção: extração do minério, quebra da gipsita, calcinação e seleção. Após sua retirada da mina, a gipsita deve ser quebrada para que seus pedaços se adequem aos fornos nos quais ocorrerá o processo de calcinação. Este último consiste em um processo térmico para desidratação da gipsita. O processo de beneficiamento da gipsita pode ser melhor compreendido com a análise da figura 2.4.



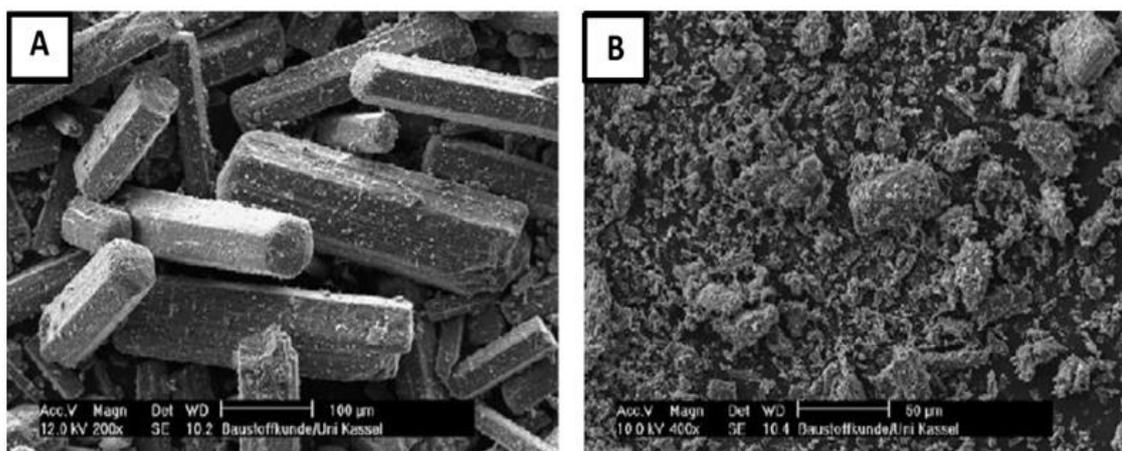
**Figura 2.4** :fluxograma do processo de beneficiamento da gipsita

O processo de calcinação do gesso é responsável pela redução da água de cristalização em 75%. Neste processo o tipo de gesso produzido (gesso- $\alpha$  ou gesso- $\beta$ ) depende das condições de temperatura e pressão as quais o minério foi submetido (PENHA, 2005). O gesso- $\beta$  é produzido a partir da desidratação da gipsita à pressão atmosférica em uma faixa de temperatura de 140°C e 160°C em fornos dos tipos: panela, marmitta, rotativa tubular e rotativo marmitta. Porém, quando a desidratação do sulfato de cálcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é realizada em equipamentos fechados (autoclaves exibido na figura 2.5) a pressões acima da pressão atmosférica obtemos o gesso- $\alpha$ .



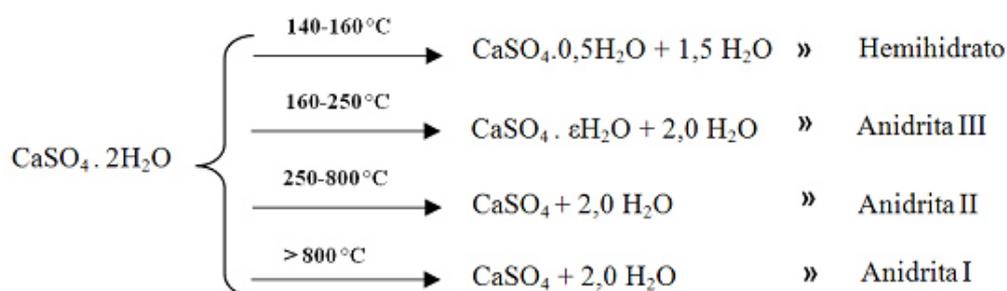
**Figura 2.5:** autoclave para a produção de gesso- $\alpha$ . Fonte: Penha (2005)

O processo de produção do gesso- $\beta$  tem duração aproximada de 40 minutos, já o gesso- $\alpha$  é obtido após 5 horas de processamento. Este contraste nos tempos de fabricação possui influencia sobre a morfologia dos hemidratos. No processo mais longo, no caso do gesso- $\alpha$ , a desidratação ocorre de maneira mais lenta, produzindo assim cristais mais uniformes e menos porosos (PHILLIPS, 1986). Já na desidratação do gesso- $\beta$ , a água cristalização é retirada de forma rápida produzindo cristais de formato irregular e mais porosos. Na figura 2.6 são apresentadas as microestruturas do gesso- $\alpha$  e do gesso- $\beta$ .



**Figura 2.6:** morfologia dos cristais do gesso- $\beta$  (A) e do gesso  $\alpha$  (B). Fonte: Reynaud *et al* (2006) e Penha (2005).

Quando a calcinação da gipsita ocorre em uma faixa de temperatura de 160°C a 250°C o produto obtido é a anidrita III ( $\text{CaSO}_4 \cdot \xi \text{H}_2\text{O}$ ). Quando a retirada da água cristalização ocorre em uma faixa de temperatura de 250°C e 800°C o produto é a anidrita II ( $\text{CaSO}_4$ ). Ultrapassando os 800°C na calcinação do sulfato de cálcio dihidratado obtém-se a anidrita I ( $\text{CaSO}_4$ ) (CANUT, 2006). Baltar (2005) e Canut (2006) definem a anidrita I como um subproduto da gipsita após a calcinação acima 800°C, dotado de um sistema cristalino cúbico, inerte e sem interesse comercial. A anidrita II apresenta sistema cristalino ortorrômbico, totalmente desidratado, insolúvel e com baixa velocidade de hidratação. A anidrita III ou anidrita ativa, assim chamada pois, ao absorver umidade volta à forma de hemidrato, seu sistema cristalino é hexagonal e também é um produto solúvel. A figura 2.7 mostra as etapas de desidratação da gipsita para diferentes temperaturas.



**Figura 2.7:** Etapas de desidratação da gipsita para diferentes temperaturas.

De acordo com Anbalagan *et al* (2009) a desidratação também afeta estrutura causando uma redução do volume específico e perda da clivagem perfeita. Além disso, segundo Garcia-Guinea *et al* (2008) a perda de água de cristalização resulta da quebra de moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  juntamente com a autodifusão da água através dos espaços dos poros e a reordenação dos cátions Ca e dos ânions  $\text{SO}_4$ .

#### 2.1.4 MICROESTRUTURA

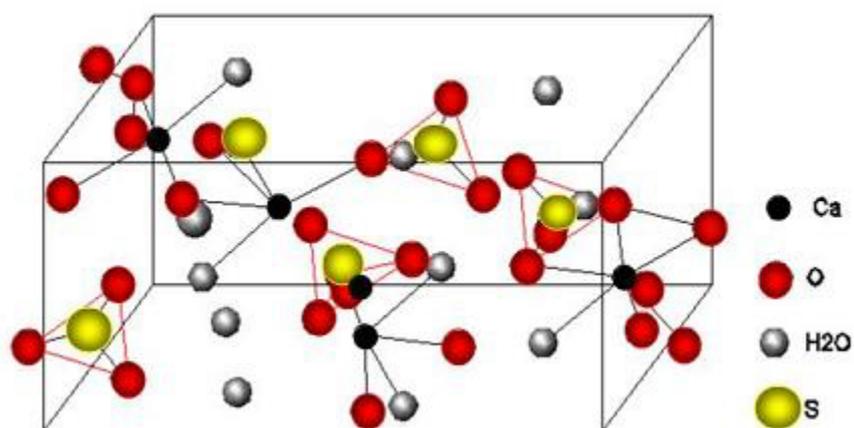
A microestrutura tem influência direta sobre as propriedades de um material (CALLISTER, 2000). Para o gesso, a morfologia dos cristais é dependente das condições de hidratação, ou seja, do volume de água adicionado ao pó na preparação da pasta. De acordo com Soares (2005) a água causa alteração dos parâmetros de desenvolvimento dos cristais como a dissolução, nucleação e cristalização.

O sulfato de cálcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é encontrado na natureza com uma microestrutura formada por cristais geminados de sistema monoclinico, além de apresentar célula unitária do tipo CFC (cúbica de faces centradas) (DANA, 1970). Os cristais encontrados na microestrutura da gipsita podem ser do tipo: prismático, tubular ou lenticular. Na tabela 2.2 são exibidas as proporções das substâncias que compõem o sulfato de cálcio dihidratado.

**Tabela 2.2:** composição química teórica da gipsita. Fonte: Baltar, 2005

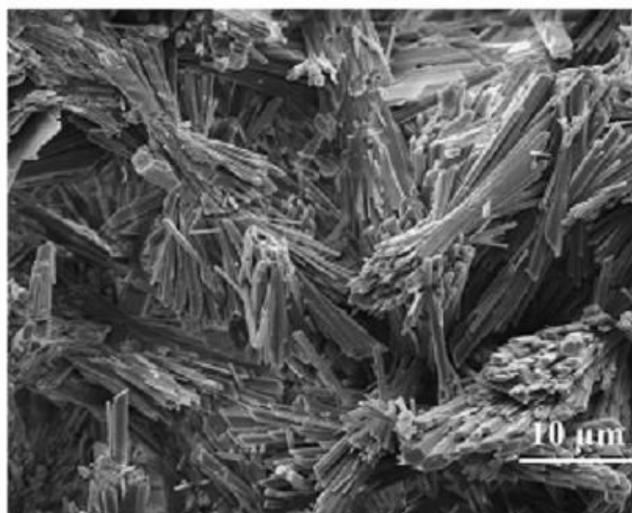
Composto	Composição (% em massa)
CaO	32,5
SO <sub>3</sub>	46,6
H <sub>2</sub> O	20,9

A microestrutura da gipsita é constituída por grupos sulfatos que são conectados por íons cálcio. A ligação entre o hidrogênio da molécula de água e o oxigênio pertencente aos grupos sulfato, explicam a existência da água de cristalização na estrutura do sulfato de cálcio dihidratado. A estrutura completa da gipsita possui um par de moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , mais seis átomos de oxigênio dos grupos sulfato, em volta do íon cálcio, a estrutura da gipsita é apresentada na figura 2.8.



**Figura 2.8:** estrutura cristalina da gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Adaptado de Canut, 2006.

O gesso- $\alpha$ , semelhantemente a gipsita apresenta cristalização na forma monoclinica (SINGH, 2007). Os cristais do hemidrato do tipo  $\alpha$  são compactos e apresentam boa solubilidade em água, o que possibilita a formação de pastas de elevada fluidez, trabalhabilidade e peças de alto desempenho (PERES *et al*, 2008).



**Figura 2.9:** microscopia eletrônica de varredura do gesso- $\beta$ . Fonte: Reynaud *et al* 2006.

Os cristais observados no gesso- $\beta$  são desordenados, pontiagudos e com interfaces fracas, além disso, esse subproduto da gipsita possui cristalização trigonal (SINGH, 2007; REYNAUD *et al*, 2006). Na figura 2.9 é apresentada a imagem de

cristais de gesso- $\beta$ . Na tabela 2.3, podem ser observadas diversas propriedades do sulfato de cálcio.

**Tabela 2.3:** propriedades das diversas formas do sulfato de cálcio. Fonte: Fernandes et al.,2010.

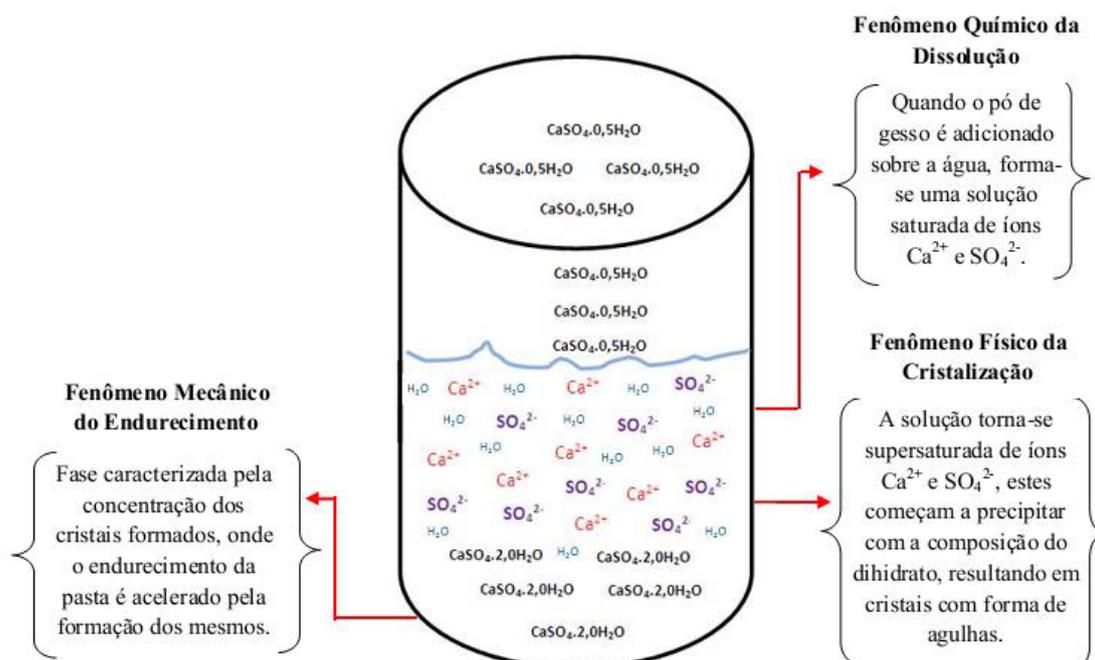
FASE CRISTALINA							
Parâmetros	CaSO <sub>4</sub> . 2H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> . 1/2H <sub>2</sub> O		CaSO <sub>4</sub> . $\xi$ H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	
<b>Nome da fase cristalina</b>	Dihidrato	Hemidrato		Anidrita III (solúvel)	Anidrita II	Anidrita I	
<b>Formas alotrópicas</b>	-	B	$\alpha$	-	-	-	
<b>Sistema cristalino</b>	Monoclínico	Romboédrico		Hexagonal	Rômbico	Cúbico	
<b>Célula unitária, nm</b>	a=1,047,b=1,515 c= 0,628	a=0,683,b=0,683 c=1,270		a=0,699,b=0,699 c=0,634	a=0,696,b=0,695 c=0,621	Nd	
<b>Água de cristalização, % p/p</b>	20,92	6,21	6,21	0,06-0,11(Canut, 2006)	0,00	0,00	
<b>Densidade, g/cm<sup>3</sup></b>	2,31	2,63	2,76	2,58	2,94	Nd	
<b>Solubilidade, g/100 g de solução (a 25°C)</b>	0,21	0,88	0,67	-	0,27	-	
<b>Massa molecular, g/mol</b>	172,17	145,15	145,15	136,14	136,14	136,14	
<b>Propriedades termodinâmicas</b>							
$\Delta H_o$ , kcal/mol	-483,42	-	-	-	-	-342,76	Nd
		376,35	375,85	339,58	340,64		
$\Delta G_o$ , kcal/g.mol	-429,60	-	-	-	-	-315,93	Nd
		343,18	343,41	312,87	313,93		
$\Delta S_o$ , cal/grau.mol	46,40	32,10	31,20	25,90	25,90	25,50	Nd

**Nota:** nd – não determinado.

### 2.1.5 PROPRIEDADES

O processo de hidratação do pó de gesso possui grande influência sobre as propriedades do produto final, que após a secagem total resultam no dihidrato. No Brasil a fim de se garantir um correto preparo da pasta de gesso emprega-se a

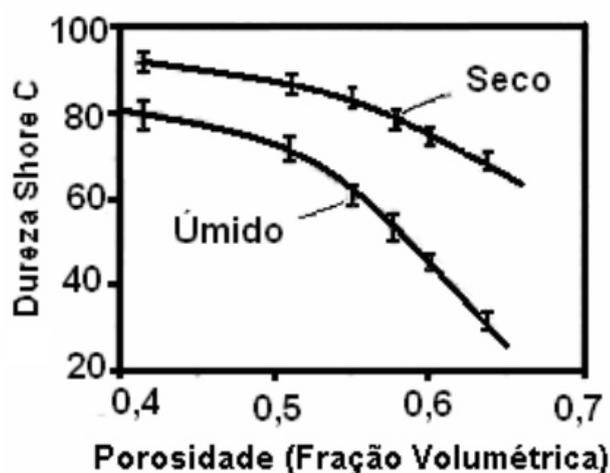
NORMA BRASILEIRA NBR-12129 (Determinação das propriedades mecânicas), para aplicação do gesso na construção (Canut, 2006). O processo de hidratação pode ser dividido em três etapas: Dissolução do hemihidrato, cristalização do dihidrato e o endurecimento da pasta (figura 2.10).



**Figura 2.10:** esquema ilustrativo do processo de hidratação do gesso. Fonte: Barbosa, 2012.

A quantidade de água utilizada no preparo da pasta de gesso é relacionada com a massa do hemidrato empregada por meio da relação água/gesso. Este é o parâmetro de maior influência quando se analisa o tempo de pega da pasta gesso. O tempo de cura ou tempo de pega é o intervalo de tempo necessário para que a pasta de gesso endureça e adquira resistência mecânica. A quantidade de água tem influência direta no tempo de pega, ou seja, quanto maior o volume de solvente na razão água gesso maior será o tempo de cura da pasta, caso a razão água gesso apresente menor volume de água menor será o tempo de pega. Para Antunes (1999) o conhecimento e o domínio do tempo necessário para a cura total do gesso são de grande importância para determinar as aplicações específicas do material. Além da razão água/gesso, outros fatores como temperatura, tamanho da partícula e emprego de aditivos influenciam o tempo de pega.

A relação água/gesso também afeta as propriedades mecânicas (resistência à compressão, flexão e dureza.) do dihidrato produzido. Isto está relacionado com o aumento da porosidade do material produzido em função do volume de água empregado no preparo da pasta. Os poros são resultantes da evaporação da água durante a secagem da pasta, resultando em vazios na estrutura do corpo. Logo, quando maior a quantidade de água no preparo da pasta de gesso maior será a quantidade de poros formados, o que implica na redução da uniformidade do material e conseqüentemente alteração das suas propriedades mecânicas. O aumento da porosidade na estrutura do corpo produzido a partir da pasta de gesso acaba afetando o volume específico do mesmo. A figura 2.11 apresenta a relação entre a dureza Shore C e a porosidade.



**Figura 2.11:** dureza do gesso- $\beta$  (úmido e seco) em função da porosidade. Fonte: Coquard e Boistelle (1994).

O crescimento dos cristais também influencia as propriedades mecânicas dos do gesso. Isso ocorre devido ao tamanho que os mesmos podem atingir durante a hidratação. Quando uma elevada quantidade de água é utilizada no preparo da pasta, a velocidade de crescimento dos cristais é reduzida, permitindo assim um maior intervalo de tempo para o crescimento das agulhas. Os cristais formados nessa condição são longos e irregulares tornam o material menos resistente.

Assim, com a análise da tabela 2.4 é fácil concluir que com uma menor razão água/gesso o dihidrato produzido possui uma maior resistência mecânica quando comparados a amostras do mesmo material com maiores razões água/gesso. Esta ocorrência é relacionada à rápida formação de numerosos núcleos de cristalização, que permitem o desenvolvimento de muitos pequenos cristais que se apresentam com uma maior densidade no produto final (Canut, 2006; Soares, 2005).

**Tabela 2.4:** Propriedades mecânicas para o gesso de construção. Fonte: (Antunes, 1999).

<b>Propriedade</b>	<b>Razão água/gesso</b>	<b>(Mpa)</b>
<b>Resistência à compressão</b>	0, 650 – 0, 450	9,93 – 27,29
<b>Resistência à flexão</b>	0, 653 – 0, 433	4,40 – 10,50
<b>Dureza Superficial</b>	0, 483 – 0, 450	13,55 – 53,08

O emprego do gesso como isolante térmico em edificações representa uma das possíveis soluções que podem ser adotadas para enfrentar os problemas relacionados com a energia em edifícios históricos e atuais (BIANCO *et al*, 2015). Isto se deve ao fato de gesso ser um material de baixa condutividade térmica, de 3 a 4 vezes menor que o concreto, devido aos grandes vazios presentes nos espaços intercrystalinos (DIAS e CINCOTO, 1995). FROTA e SCHIFFER (2001) citam que a condutividade térmica das argamassas de gesso é de 0,53 W/m°C e em forma de placas, 0,35 W/m°C.

De acordo com Athienitis (1997) ambientes sujeitos a incidência do sol, tiveram o seu desempenho térmico avaliado e apresentaram redução de 4°C na temperatura interior, quando foram usadas placas de gesso para o revestimento interno.

A porosidade além de influenciar as propriedades mecânicas do gesso também altera a sua condutividade térmica. O aumento do número de poros reduz o valor da condutividade térmica do material, pois, o ar que fica alojado nos poros, possui um baixo valor de condutividade térmica (0,023 W/m.K) constituindo assim um elemento muito resistente à passagem de calor. Silva e Dantas (2012) utilizaram o bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub>) para produção de corpos de prova de gesso com porosidade aumentada e propriedades mecânicas aceitáveis.

## 2.2 O MÉTODO DO FIO QUENTE

### 2.2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O método do fio quente é uma técnica experimental empregada para a determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. O método do fio quente é bastante adequado às necessidades da indústria cerâmica, devido às dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios (SANTOS, 1988). Este método de medida é tem grande aplicação, tanto em laboratórios industriais, como em grandes centros de pesquisa, para medir a condutividade térmica de materiais refratários. A *International Organization for Standardization* (ISO) regulamenta o método do fio quente pela norma ISO – 8894.

Schieirmacher em 1888 descreveu o método do fio quente, porém, apenas em 1949, que o método teve sua primeira aplicação prática feita por Van Der Held e Van Drunen. O primeiro emprego do método do fio quente para a determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos foi feito por Haupin em 1960, este trabalho serviu de base para a criação de todas as variantes do método do fio quente (SCHIEIRMACHER, 1888; VAN DER HELD e VAN DRUNEN 1949; HAUPIN 1960).

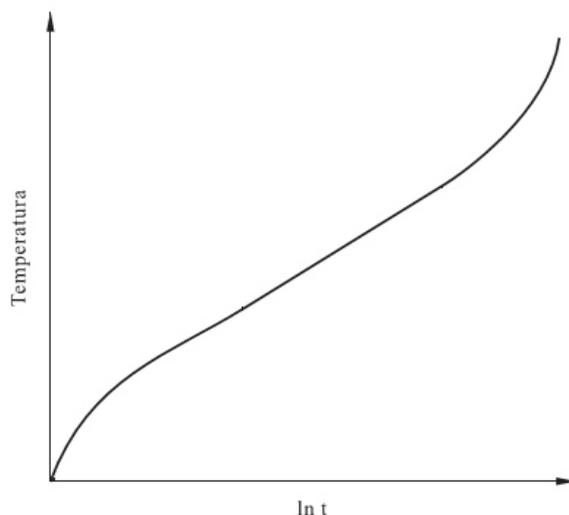
O método do fio quente é um método direto, absoluto e não estacionário. Um método de medição de condutividade térmica é dito direto quando, esta propriedade é avaliada a partir de dados experimentais como, por exemplo, o método da placa quente. O método Flash é um exemplo de medição de condutividade térmica indireto, pois, nele primeiro é medida a difusividade térmica do material e com conhecimento da massa específica e do calor específico do material é possível determinar a condutividade térmica da amostra. Ou seja, métodos indiretos são aqueles que medem através de experimentos uma dada propriedade do material avaliado e a partir dela é possível estimar a condutividade térmica. A técnica do fio quente não utiliza amostras calibradas como referência, ou seja, a medida da condutividade térmica é feita diretamente na amostra a ser avaliada, ao contrário dos métodos comparativos. Quando se considera o regime de troca de calor o método do fio quente é classificado como uma técnica de medição não estacionária,

isso implica que, o regime de troca de calor é transiente, logo, a temperatura na amostra não é uniforme, durante o intervalo de tempo de medição da propriedade.

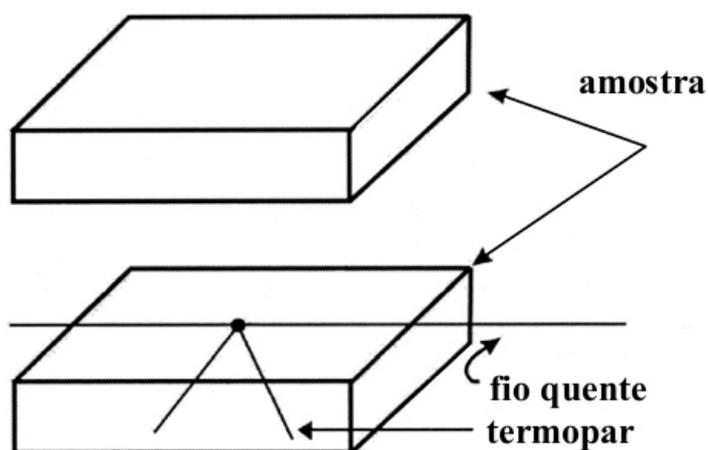
### **2.2.2 FUNCIONAMENTO DO MÉTODO DO FIO QUENTE**

De acordo com Santos (2002) o método do fio quente é considerado na atualidade, como uma técnica precisa na determinação da condutividade térmica de materiais cerâmicos. A ISO - 8894 é dividida em duas partes, a primeira padroniza as medições feitas a temperaturas inferiores a 1250°C, para materiais cerâmicos com condutividade térmica inferior a 1,5 W/m.K e difusividade térmica menor que  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Já a segunda parte da norma ISO – 8894 aborda as medidas feitas a temperaturas maiores ou iguais a 1250°C, para materiais cerâmicos com condutividade térmica entre 1,5 W/m.K 25 W/m.K.

O método do fio quente consiste em aquecer, por um determinado intervalo de tempo, uma resistência elétrica posicionada entre as superfícies de dois corpos de prova em contato do material a ser avaliado. Um fio é utilizado como resistência elétrica, o circuito é alimentado por uma fonte de tensão e a temperatura é medida e armazenada através de um termopar conectado a um datalogger respectivamente. A fonte de tensão produz uma corrente elétrica, que devido ao efeito Joule, libera uma dada quantidade de calor por unidade de tempo e por unidade de comprimento do fio, que irá propagar-se ao longo do material, produzindo assim um campo transiente de temperaturas. Então conhecendo os valores de temperatura para cada instante de tempo é possível calcular o valor da condutividade térmica utilizando para isso um gráfico (figura 2.12) temperatura versus  $\ln(t)$ , onde  $t$  é o tempo. A figura 2.13 o esquema de montagem para realização de um ensaio através do fio quente.



**Figura 2.12:** gráfico da temperatura em função do logaritmo natural do tempo.

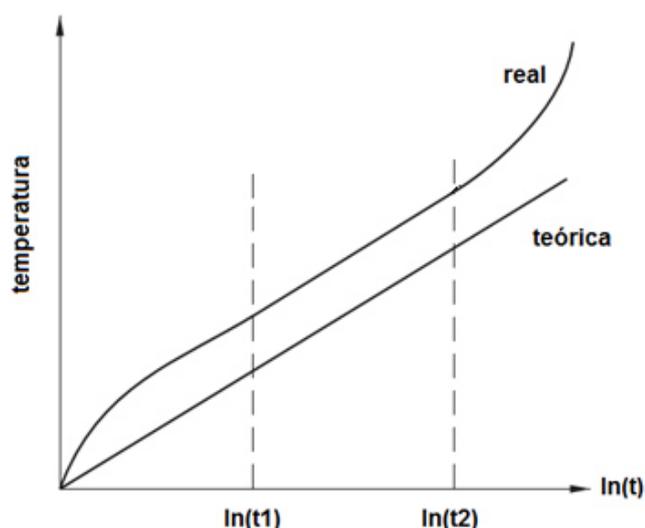


**Figura 3.13:** esquema ilustrativo de ensaio utilizando o método do fio quente. Fonte: Santos, 2002.

O modelo matemático que descreve a transferência de calor no método do fio quente faz duas considerações importantes. A primeira é que o corpo de prova é modelado como sendo um sólido infinito. A outra consideração é assumir o fio quente como uma fonte de calor ideal, de comprimento infinito, massa nula, capacidade térmica igual a zero e diâmetro também igual à zero (BOER, 1980). Nessa técnica, o gradiente de temperatura através da amostra é muito baixo, o que é sem dúvida uma virtude desse método, uma vez que um método ideal de medida de condutividade térmica é aquele capaz de medir essa propriedade segundo um gradiente zero através da amostra (SANTOS, 2005).

Em uma situação prática, um fio de diâmetro muito reduzido é usado como resistência elétrica, substituindo a fonte de calor ideal, o sólido infinito também é substituído por corpos de prova finitos. Devido a essas considerações, as dimensões finitas da amostra, a capacidade térmica do fio quente, a resistência de contato presente entre ele e o corpo de prova impõe ao método um tempo mínimo e máximo para realização dos ensaios.

Comparando as curvas real e teórica (figura 2.14), nota-se que elas apresentam o mesmo comportamento apenas em suas regiões intermediária. Logo, utiliza-se esta região intermediária para o cálculo da condutividade térmica por meio do método do fio quente. Santos (2004), explica que a diferença entre as curvas real e teórica no trecho inicial, decorre da resistência de contato entre o fio quente e a amostra e à inércia térmica do material, já a parte final das curvas são influenciadas pelas dimensões finitas do corpo de prova. A região intermediária da curva temperatura versus  $\ln(t)$ , apresenta comportamento linear, sendo assim, conhecendo a inclinação desse trecho é possível calcular a condutividade térmica do matéria analisado.



**Figura 2.14:** comparação entre as curvas teórica e real do método do fio quente.

O método do fio quente apresenta duas limitações, são elas: materiais com altos valores de condutividade térmica e materiais condutores elétricos. Os primeiros afetam a confiabilidade dos resultados produzidos pelo método, já que a alta

condutividade térmica reduziria o tempo de transiente térmico, assim a solução para esse tipo de material, seria utilizar corpos de prova com dimensões grandes o suficiente, o que dificulta o processo de medida de temperatura e aumenta os custos. Para os materiais condutores elétricos, para evitar acidentes, a solução seria o isolamento elétrico tanto do fio como das amostras.

Metrevelle *et al* (2010) , Santos e Cintra (1991), recomendam alguns cuidados para assegurar a confiabilidade, reprodutibilidade, e precisão dos dados:

- Utilizar uma resistência elétrica fina, que se aproxime o máximo possível da fonte de calor linear teórica;
- Assegurar o melhor contato possível entre ambas às amostras e o fio quente, reduzindo assim os efeitos da resistência de contato;
- Não considerar, para efeito de cálculo, o trecho inicial da curva, eliminando assim os efeitos de contato térmico entre a resistência elétrica e o material da amostra;
- Limitar o tempo de ensaio para assegurar que o tamanho finito da amostra não afete as temperaturas medidas.

### **2.2.3 TÉCNICA PADRÃO DO FIO QUENTE (CRUZ DE MEDIÇÃO)**

O método do fio quente atualmente possui quatro variações conhecidas: técnica padrão de fio quente (cruz de medição), técnica de fio quente paralelo, técnica de resistência do fio quente e técnica de dois termopares. Além de compartilharem o mesmo modelo teórico, as quatro variantes do método do fio quente fazem uso de dois corpos de prova (paralelepípedos retangulares com as dimensões aproximadas de 230 mm x 114 mm x 90 mm) ao mesmo tempo durante o ensaio, porém, as equações que calculam a condutividade térmica são diferentes para cada variação. Os cuidados citados por Metrevelle *et al* (2010) , Santos e Cintra (1991) devem ser observados em todas os quatro arranjos. Neste trabalho foi utilizada a técnica padrão do fio quente.

Aplicada para materiais com valores de condutividade térmica abaixo de 2,0 W/m.K, difusividade térmica inferior a  $8,333 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  e massa específica acima de  $500 \text{kg}/\text{m}^3$ , essa técnica foi desenvolvida por Mittenbuhler (1964). De acordo com Santos (2005) a técnica da cruz de medição baseia-se em medir a variação da temperatura no fio em função do tempo, já que o gradiente de temperatura é função da condutividade térmica do material. Essa medida é feita por meio de um termopar, que tem sua junção de medição soldada ao ponto médio do fio utilizado como resistência elétrica.

Para a montagem do arranjo da técnica padrão do fio quente, são feitos dois canais ortogonais entre si para acomodar o fio e o termopar (cruz de medição), já soldados, na superfície de um dos corpos de prova. Estas ranhuras devem possuir profundidade aproximadamente igual ao diâmetro do fio e do termopar. Em seguida a fixação da cruz de medição, utilizando-se uma pasta feita do material a ser analisado e 2 % dextrina preenche-se os canais e então é colocado sobre este corpo de prova com as ranhuras o segundo corpo de prova. A norma ISO 8894 – 1, que regulamenta essa técnica as superfícies em contato devem ser bem polidas, para proporcionar o melhor contato térmico possível.

#### 2.2.4 MODELO MATEMÁTICO DO MÉTODO DO FIO QUENTE

Para uma abordagem analítica do método do fio quente, considera-se o fio como uma fonte linear de calor ideal imersa em um meio infinito, homogêneo e isotrópico. A temperatura inicial do meio é  $T_0$ . Então, para determinarmos a temperatura  $T(r, t)$  a uma distância radial  $r$  da fonte de calor no instante  $t$  em um cilindro infinito, é necessário resolver a equação da condução de calor, que para essas condições, Ozisik (1993) escreve em coordenadas cilíndricas (equação 1-a) na seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1-a)$$

O modelo adotado apresenta as seguintes condições iniciais (equações 1-b 1-c) e de contorno (equação 1-d):

$$T = T_0, r \geq 0, t = 0 \quad (1-b)$$

$$T = T_0, r \rightarrow \infty \quad (1-c)$$

$$-2rk\pi \frac{\partial T}{\partial r} = q', r = 0 \quad (1-d)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

Sendo  $k$  a condutividade térmica do material,  $\alpha$  a difusividade térmica do material e  $r$  a distância radial em relação à fonte de calor e  $q'$  é a potência dissipada por unidade de comprimento da fonte de calor linear resistência.

Ozisik (1993) resolveu a equação 1-a, utilizando a técnica de separação de variáveis e obteve a seguinte solução para a equação 1-a:

$$T - T_0 = \frac{q'}{4\pi k} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3-a)$$

Sendo:

$$u = r^2 / 4\alpha t \quad (3-b)$$

Ozisik (1990) faz uso da função integral exponencial definida como:

$$E_1(\zeta) = \int_{\zeta}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (3-c)$$

A equação 3-c pode ser aproximada pela seguinte série de potências:

$$E_1(\zeta) = -\gamma - \ln(\zeta) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \zeta^n}{n.n!} \quad (4-d)$$

Onde  $\gamma$  é a constante de Euler ( $\gamma = 0,5772156649\dots$ ) e  $\zeta = r^2/4\alpha t$ .

Substituindo a equação 4-d na equação 4-a, temos que:

$$T - T_0 = \frac{q'}{4\pi k} \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) - \frac{1}{4}\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^2 + \left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right)^3 - \dots \right] \quad (5)$$

Considerando a hipótese de tempos longos,  $t$  assume valores que satisfazem a expressão  $t \gg r^2/4\alpha t$ , desprezando os termos de  $t^{-1}$  e  $t^{-2}$  em diante, maneira que a equação 5 torna-se:

$$T - T_0 \cong \frac{q'}{4\pi k} \left[ -\gamma - \ln\left(\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \right] \quad (6)$$

Para uma a posição  $r = a$ , podemos escrever a equação 6 como:

$$\Delta T(a, t) = T(a, t) - T_0 \cong \frac{q'}{4\pi k} \left[ -\gamma - \ln \left( r^2 / 4\alpha t \right) \right] \quad (7)$$

Assim, em um gráfico de  $\Delta T$  em função de  $\ln(t)$ , tem-se uma região linear cujo coeficiente angular é  $\beta = q'/4\pi k$ , para tempos longos. Na realidade, essa região linear usada para o cálculo da condutividade térmica sempre será a região final do experimento, uma vez que para obter da equação 7 fez-se à suposição para chegar à equação 6. Portanto, diferenciando a equação 7 com relação à  $\ln(t)$ , a condutividade térmica da amostra pode ser expressa na forma:

$$k = \frac{q'}{4\pi\tau} \quad (8)$$

Onde  $\tau$  é o coeficiente angular do trecho linear do gráfico de  $\Delta T$  em função de  $\ln(t)$ .

A potência linear dissipada pelo fio quente, considerada constante pode ser calculada pela equação abaixo:

$$q' = \frac{I^2 R}{L} \quad (9)$$

Sendo  $I$  é a corrente elétrica que passa através do fio quente medida em Ampère (A),  $R$   $L$  são respectivamente a resistência elétrica em Ohm ( $\Omega$ ) e o comprimento do fio utilizado.

## 2.3 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

### 2.3.1 IMPORTÂNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica  $k$  é uma propriedade física dos materiais de grande importância quando se avalia a transferência de calor por condução. Ela está relacionada com a facilidade que um determinado material tem de conduzir calor, ou seja, quanto maior seu valor mais fácil a energia térmica será transferida, porém, quando seu valor é reduzido, o fluxo de calor encontrará maior dificuldade em sua passagem. Em aplicações em que o objetivo é o isolamento térmico, a transferência de calor entre dois meios deve ser minimizada e para isso um material com baixo valor de condutividade térmica deve ser selecionado. Com tudo, quando é necessário o aumento da eficiência da transferência de calor, um material com alto valor de condutividade térmica é empregado. É esta propriedade que demarca o grau da temperatura de trabalho do material, tornando-se importante na transferência de calor transiente (METREVELLE, 2010).

Além da condutividade térmica, outras propriedades físicas tem grande influência na transferência de calor por condução, estas são: a difusividade térmica ( $\alpha$ ) e o calor específico ( $c_p$ ). De acordo com Incropera (2013), a difusividade térmica ( $\alpha$ ) mede a capacidade de certo material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Já o calor específico ( $c_p$ ), define a variação térmica de determinado material ao receber determinada quantidade de calor. A difusividade térmica pode ser calculada em função do calor específico ( $c_p$ ), condutividade térmica ( $k$ ) e da massa específica ( $\rho$ ), através da equação 2.

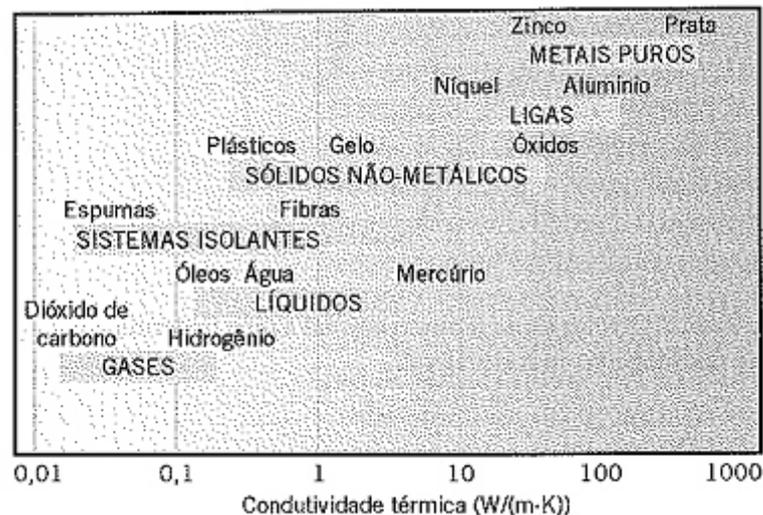
Tomando a lei de Fourier para o fluxo de calor, podemos escrever uma equação matemática que relaciona a condutividade térmica, o fluxo de calor e o gradiente de temperatura, para a transferência de calor por condução na direção  $x$ :

$$k_x \equiv - \frac{q''}{(\partial T / \partial x)} \quad (10)$$

A condutividade térmica nas direções  $y$  e  $z$  têm definições semelhantes ( $k_y$  e  $k_z$ ). Caso o material seja isotrópico, a condutividade térmica independe da direção da transferência de calor e temos:

$$k_x = k_y = k_z = k \quad (11)$$

Na figura 2.15 é possível observar os valores de condutividade térmica em ( $W/m^2.K$ ) para diferentes estados da matéria.



**Figura 2.15:** faixa de condutividade térmica para diferentes estados da matéria. Fonte: Incropera, 2003.

### 2.3.2 A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAIS SÓLIDOS

A energia térmica em um material sólido pode ser transportada devido à ocorrência de dois efeitos. O primeiro é movimentação dos elétrons livres presentes na estrutura atômica do material, o outro é decorrente das ondas de vibração do retículo ou rede (arranjo periódico dos átomos). Essas ondas são denominadas de fônons. A cada um desses mecanismos está associada uma condutividade térmica, esses efeitos são aditivos, logo a condutividade térmica do material é a resultante da

soma das duas contribuições (CALLISTER 2000 e INCROPERA et al, 2003). Assim a condutividade térmica de um material pode ser expressa em função das contribuições relativas aos elétrons livres e aos fônons de acordo com a equação a seguir.

$$k = k_e + k_r \quad (12)$$

Onde  $k_e$  é a condutividade térmica devido ao movimento dos elétrons livres e  $k_r$  é a condutividade térmica devido à energia vibracional do retículo. Em geral uma contribuição é predominante.

A parcela de  $k_r$  é originada pelo movimento global dos fônons, causado pela existência de um gradiente de temperatura, permitindo assim que estes se desloquem de regiões com temperaturas maiores para regiões com temperaturas menores.

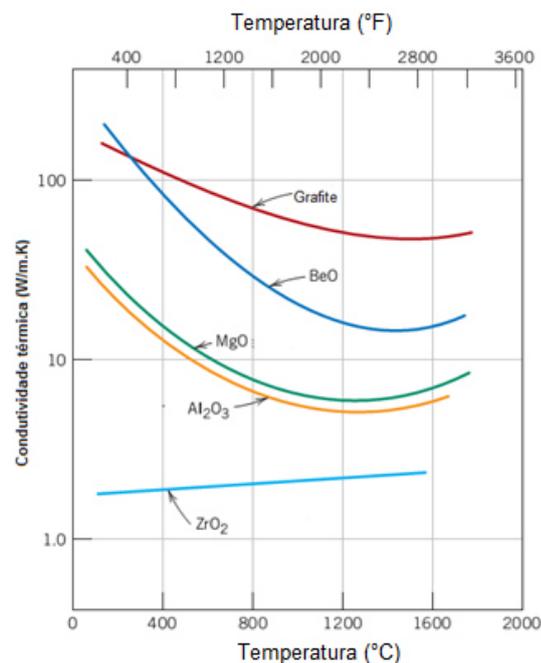
De acordo com Callister (2007), quando uma região de um material tem sua temperatura elevada, os elétrons dessa área apresentam um aumento na sua energia cinética. Estes por sua vez deslocam-se para regiões com temperaturas menores, na quais parte de sua energia é transferida aos próprios átomos, como energia vibracional, devido a colisões com os fônons e imperfeições existentes no cristal. A influência de  $k_e$  sobre  $k$  é diretamente proporcional ao número de elétrons livres, ou seja, quanto maior o número de elétrons livres, maior a contribuição de  $k_e$ , já que uma quantidade maior de colisões irá ocorrer.

O mecanismo eletrônico de transporte de calor nos materiais metálicos de alta pureza é mais eficiente. Isto se deve ao grande número de elétrons livres, as altas velocidades dos elétrons e também ao fato de que os elétrons não são tão facilmente dispersos ao contrário dos fônons. Isso explica o fato de os materiais metálicos serem bons condutores de calor.

Os materiais cerâmicos não possuem um grande número de elétrons livres, como é caso dos metais. Isto explica a classificação dos cerâmicos como maus condutores de calor ou isolantes térmicos. Sendo assim, a principal parcela de

contribuição para a condutividade destes materiais é relativa aos fônons. Os fônons não são tão efetivos como os elétrons livres no transporte da energia calorífica, o que é um resultado do espalhamento muito eficiente dos fônons pelas imperfeições do retículo (CALLISTER, 2000). Logo,  $k_r$  é muito menor que  $k_e$ . A regularidade do arranjo tem forte influência sobre  $k_r$ , já que o espalhamento dos fônons é muito mais acentuado quando a estrutura da rede tem um alto grau de irregularidade e desordem, por isso, cerâmicas cristalinas possuem condutividade térmica maior que as cerâmicas amorfas.

Além da estrutura cristalina, a temperatura afeta a condutividade térmica dos materiais cerâmicos, de modo que com o aumento da temperatura a maioria dos materiais cerâmicos apresenta redução no valor de sua condutividade térmica (a temperaturas relativamente baixas). Isto ocorre devido ao aumento do espalhamento dos fônons, como resultado da elevação da temperatura. A condutividade térmica dos materiais cerâmicos pode ser aumentada, quando estes são expostos a temperaturas elevadas, o que se deve à transferência de calor por radiação. A eficiência desse processo é diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Na figura 2.16 pode ser observado o comportamento da condutividade térmica em função do aumento da temperatura para alguns materiais cerâmicos.



**Figura 2.16:** Comportamento da condutividade térmica de alguns materiais cerâmicos em função da temperatura. Fonte: Callister, 2007 (adaptado).

A porosidade é outro fator que pode ter considerável influência sobre a condutividade térmica dos materiais cerâmicos. O aumento do volume e/ou do número de poros reduz o valor da condutividade térmica dos cerâmicos. Isso explica o fato de que muitos materiais cerâmicos empregados como isolantes térmicos são porosos. Quando se analisa a transferência de calor através de um poro, identifica-se que este é um processo lento e de baixa eficiência. No interior dos poros encontra-se, geralmente, ar estagnado, que é um péssimo condutor de calor ( $k = 0,02 \text{ W/m.K}$ ). Além disso, a convecção gasosa no interior dos poros é também ineficiente.

### **2.3.3 MATERIAIS CERÂMICOS PARA ISOLAMENTO TÉRMICO**

Isolamento térmico é definido como a proteção de superfícies aquecidas ou resfriadas, com o objetivo de reduzir a efetividade da troca de calor com o meio no qual a superfície está localizada. Como exemplo de superfícies que podem receber a proteção de um isolamento térmico tem-se: as paredes de um forno industrial, as paredes externas e internas de uma edificação ou as paredes internas de uma garrafa térmica. Na prática o isolamento térmico é feito pela aplicação de materiais de baixa condutividade térmica ou de composto produzidos a partir da combinação de materiais de condutividade térmica reduzida.

De acordo com Incropera (2003) os sistemas de isolamento térmico caracterizam-se por apresentar uma condutividade térmica efetiva. Esta depende da condutividade térmica do material empregado como também das propriedades radiantes das superfícies do material sólido, além da natureza e fração volumétrica ar ou dos espaços entre as partículas.

Geralmente os materiais empregados no isolamento térmico são porosos, pois, no interior dos poros o ar é aprisionado. Este fato além de evitar a movimentação do fluido, evita também a transferência de calor por convecção. Por isso, materiais porosos de baixa condutividade térmica com poros pequenos e paredes finas são tidos como bons isolantes térmicos.

Freitas (2002) cita as principais vantagens do emprego de sistema de isolamento térmico:

- Economia energética como resultado das necessidades de aquecimento e arrefecimento do ambiente interior;
- Redução do peso das paredes e das cargas permanentes sobre a estrutura;
- Diminuição do gradiente de temperaturas a que são sujeitas as camadas interiores das paredes;
- Diminuição dos riscos de condensações.

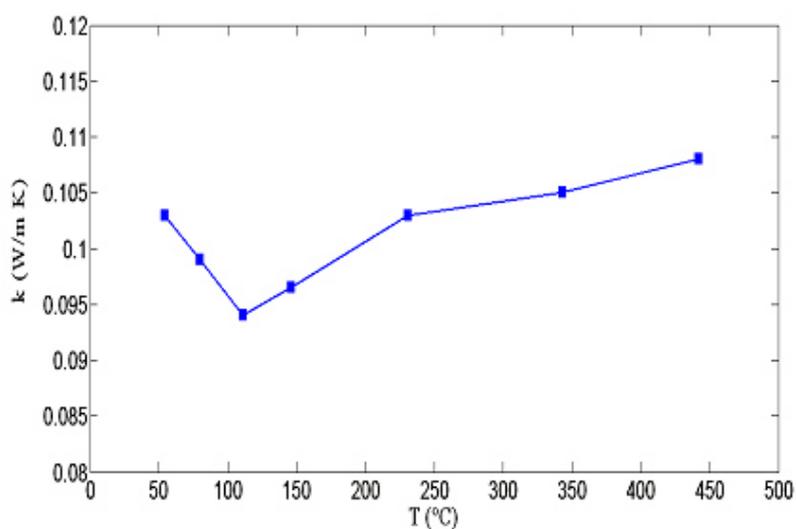
Quando se aplica o isolamento térmico em um ambiente o principal objetivo é estabelecer um conforto térmico dos indivíduos no interior do ambiente. A American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning (ASHRAE) define na norma ASHRAE 55/2004 conforto térmico como o estado mental que expressa satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. De forma análoga a NBR 15220-1/2005 estabelece o conforto térmico como a satisfação psicofisiológica do indivíduo em relação às condições térmicas do ambiente. O conforto térmico é influenciado por variáveis físicas e variáveis pessoais: as primeiras estão relacionadas à temperatura do ar, temperatura média radiante, umidade relativa do ar e velocidade relativa do ar. Já as variáveis pessoais são: atividade desempenhada pela pessoa e vestimenta utilizada pela pessoa. Além dessas variáveis, existem ainda as características individuais, aspectos psicológicos, variáveis culturais e hábitos.

O gesso além de ser um material de baixo custo e de boa trabalhabilidade pode ser aplicado como isolamento térmico de ambientes. Isto é possível devido ao baixo valor da condutividade térmica que o material apresenta. O gesso quando utilizado como isolamento térmico de ambientes, representa uma solução de baixo custo para garantir o conforto térmico e também reduzir os custos relativos ao consumo de energia elétrica, com a vantagem de ser um produto comum tradicional no campo da construção civil (BARBERO *et al.* 2014 e BIANCO *et al.*, 2015) . Na tabela 2.5 são apresentados valores da condutividade térmica do gesso.

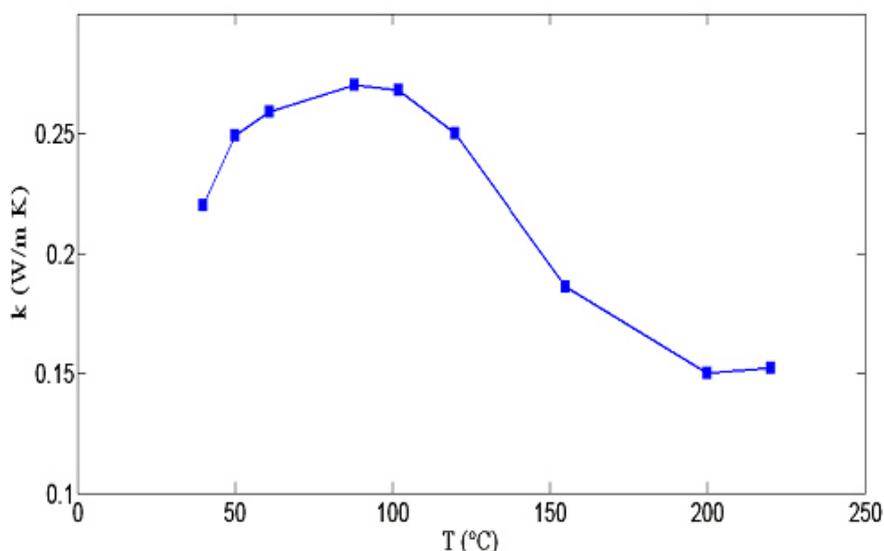
**Tabela 2.5:** condutividade térmica do gesso em diferentes aplicações. Fonte: Incropera (2003) e Frota e Schiffer (2001).

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Gesso celular	0,50
Gesso (placa)	0,35
Gesso paramentado c/ cartão antichama	0,35
Gesso com fibras minerais	0,35
Gesso projetado	0,50
Gesso com vermiculite 1:1	0,30
Gesso com vermiculite 1:2	0,25
Argamassa de gesso	0,53
Argamassa de cal e gesso	0,70
Reboco de gesso e areia	0,22

Mansour *et al* (2013) determinou, em regime permanente de condução de calor, a condutividade térmica para o gesso em pó e em corpos de prova cilíndrico, cujos respectivos valores são:  $k = (0.10 \pm 0.04)W/m K$  e  $k = (0.22 \pm 0.03)W/m K$ . Além disso, o autor avaliou o comportamento da condutividade térmica das amostras em função da temperatura como pode ser observado nas figuras 2.17 e 2.18.



**Figura 2.17:** variação da condutividade térmica do gesso em pó em função da temperatura. Fonte: Mansour, (2013)



**Figura 2.18:** variação da condutividade térmica dos corpos de prova de gesso em formato cilíndrico em função da temperatura. Fonte: Mansour, (2013)

Correia e Souza (2009) utilizaram o método do fio quente para determinar a condutividade térmica de um compósito a base de gesso e celulose. Os valores medidos são exibidos tabela 2.6.

**Tabela 2.6:** condutividade térmica do compósito gesso-celulose. Fonte: Correia e Souza (2009).

Celulose(%)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade(g/cm <sup>3</sup> )
0,0	0,75±0,02	1,94
10,0	0,61±0,03	1,50
20,0	0,45±0,01	1,33
30,0	0,40±0,03	1,18

## 2.4 MÉTODOS NUMÉRICOS

### 2.4.1 MÉTODO DE DIFERENÇAS FINITAS

Diversos problemas de transferência de calor por condução apresentam soluções exatas quando resolvidos através de métodos analíticos. De acordo com Incropera *et al* (2003) uma gama de problemas que envolvem geometrias simples e condições de contorno, são solucionados por meio desses métodos e são documentados na literatura. Porém, um grande número de problemas de condução de calor não pode ser resolvido por meio dos métodos analíticos, já que uma

geometria mais complexa e/ou as condições de contorno excluem tais soluções. Em situações como essas é necessário recorrer a técnicas numéricas como diferenças finitas, elementos finitos ou elementos de contorno. Os métodos numéricos são largamente empregados na solução de problemas de mecânica dos fluidos, transferência de massa e transferência de calor.

O método de diferenças finitas apresenta formulação simples podendo facilmente ser aplicado a problemas com duas ou três dimensões. Esta técnica numérica também é empregada na solução de equações diferenciais parciais encontradas em diversos problemas de engenharia.

Apesar da simplicidade que as diferenças finitas possuem na representação das equações diferenciais parciais que governam o problema em questão, Ozisik (1993) afirma que é necessário um considerável conhecimento, do problema analisado, para seleção do esquema de diferenças finitas adequado para a solução. Fatores como o tipo de equações diferenciais parciais, o número de dimensões, o sistema de coordenadas envolvido, a linearidade ou não linearidade das condições de contorno e das equações envolvidas, a dependência do problema em relação ao tempo (transiente ou regime permanente), têm influência sobre a escolha do método numérico a ser utilizado.

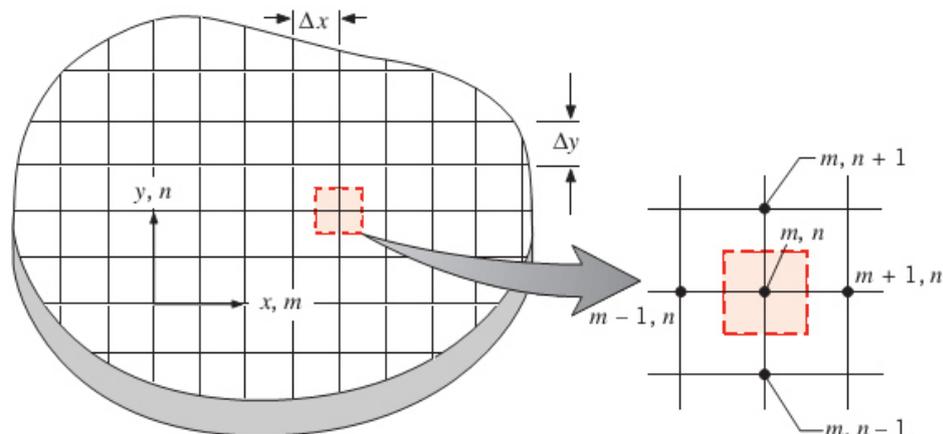
De acordo com Ruggiero e Lopes (1997), o método de diferenças finitas baseia-se na transformação de equações diferenciais em sistemas de equações algébricas. A técnica consiste na substituição de cada derivada ou diferencial contido nas equações diferenciais por acréscimos finitos das variáveis, ou seja, por aproximações de diferenças finitas. Essas aproximações são observadas nas equações 13-a, 13-b, 13-c.

$$dx \approx \Delta x, \quad dy \approx \Delta y \quad (13-a)$$

$$\frac{dy}{dx} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x}, \quad \frac{d^2y}{dx^2} \approx \frac{\Delta^2 y}{\Delta^2 x}, \quad \frac{d^3y}{dx^3} \approx \frac{\Delta^3 y}{\Delta^3 x} \quad (13-b)$$

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{\Delta u}{\Delta x}, \quad \frac{d^2u}{dx^2} \approx \frac{\Delta^2 u}{\Delta^2 x}, \quad \frac{d^3u}{dx^3} \approx \frac{\Delta^3 u}{\Delta^3 x} \quad (13-c)$$

Quando se utiliza uma solução analítica em um problema de condução de calor, é possível determinar a temperatura em qualquer ponto do meio. Contudo, quando a análise numérica empregada, apenas a temperatura em pontos discretos é determinada. A seleção desses pontos é feita da seguinte forma: o meio estudado é dividido em um número de pequenas regiões, e a essas regiões é atribuído um ponto de referência em seu centro. Este ponto é chamado de nó e conjunto é denominado de rede nodal, rede ou simplesmente malha. Os pontos nodais devem ser representados por um esquema numerado, que para um meio bidimensional, pode assumir a forma mostrada na figura logo abaixo. As posições  $x$  e  $y$  são designadas pelos índices  $m$  e  $n$  respectivamente. Sendo  $\Delta x$  e  $\Delta y$ , espaçamentos entre os nós nas direções  $x$  e  $y$  respectivamente. Na figura 2.19 é exibida a malha com os pontos discretos.



**Figura 2.19:** Malha utilizada na condução bidimensional com aproximação por diferenças finitas.

Fonte: Incropera *et al*,(2013).

#### 2.4.2 O MÉTODO ADI (ALTERNATING DIRECTION IMPLICITE)

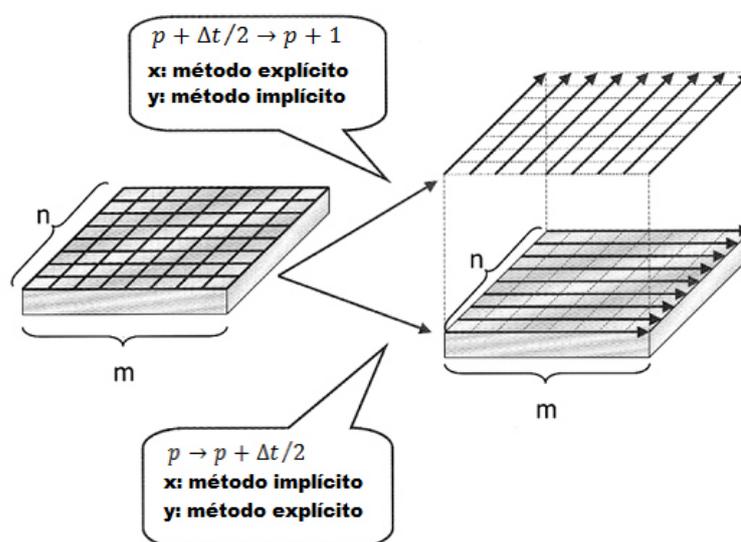
Pesquisadores como Peaceman e Rachford (1955), Douglas (1955), Douglas e Rachford (1956), Douglas e Gunn (1964), criaram uma classe de técnicas implícitas para a solução de equações parabólicas e elípticas (equação do calor em regime transiente).

Esses novos métodos implícitos são conhecidos como *Alternating direction implicit* (ADI) ou método implícito das direções alternadas. Segundo Wang e Chen (2003), o método ADI resolve um problema bi ou tridimensional por meio da solução de dois ou três problemas unidimensionais, ou seja, os cálculos são realizados em direções alternadas.

A principal vantagem do método ADI apontada por Ozisik (1993) é a redução da matriz para uma matriz tridiagonal, que é resolvida em cada iteração, o preço pago por essa redução é a solução de uma matriz menor um número maior de vezes.

O método ADI pode ser utilizado na solução de um problema de condução de calor bidimensional em regime transiente, sem geração de calor e com as propriedades do material constantes, por diferenças finitas.

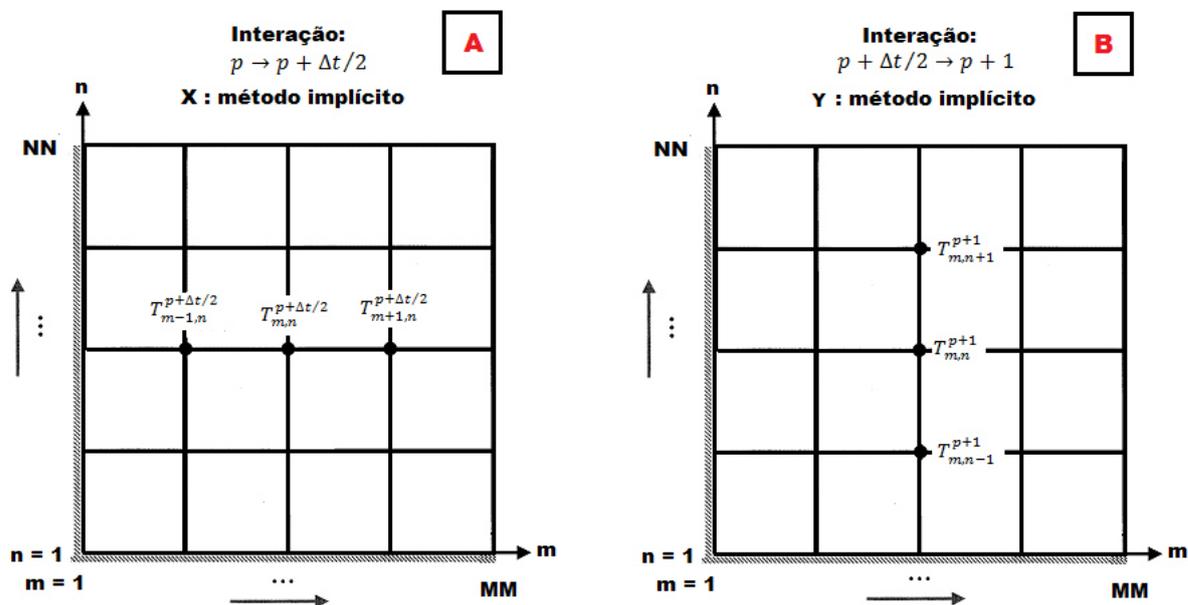
A divisão do intervalo de tempo  $\Delta t$ , feita no método ADI, em dois subintervalos iguais é necessária, pois, em uma direção é aplicado o método implícito e na outra é aplicado o método explícito. Sendo assim, durante a interação de  $p$  para  $(p+1)$ , no subintervalo de  $p$  para  $(p+\Delta t/2)$ , as equações de diferenças finitas na direção  $x$  serão resolvidas pelo método implícito, enquanto que as equações de diferenças finitas na direção  $y$  serão solucionadas através do método explícito. Esse processo se repetirá até que o tempo total definido para o problema seja atingido. A figura 2.20 ilustra como o método ADI faz a alternância de direções.



**Figura 2.20:** ilustração do método ADI. Fonte: Wang e Chen, 2003. (adaptado).

Ao se resolver as equações de diferenças finitas na direção  $x$  conclui-se que para cada valor de  $n$  na iteração de  $p$  para  $(p+\Delta t/2)$ , na malha nodal, haverá  $(MM + 1)$  equações correspondentes a temperatura  $T_{m,n}^{p+\Delta t/2}$  no ponto  $(m,n)$ , sendo que  $m = 1 \dots MM$ . Dessa maneira cada temperatura nodal  $T_{m,n}^{p+\Delta t/2}$  está relacionada com outras duas temperaturas nodais  $T_{m-1,n}^{p+\Delta t/2}$  e  $T_{m+1,n}^{p+\Delta t/2}$ . Na iteração de  $(p+\Delta t/2)$  para  $(p+1)$ , quando o método implícito é aplicado na direção  $y$  e o método explícito é utilizado na coordenada  $x$ , a mesma análise pode ser feita. A figura 2.21 ilustra a alternância do método ADI nas direções  $x$  e  $y$ .

Os coeficientes das temperaturas  $T_{m,n}$  formaram uma matriz tridiagonal, cuja solução, fornecerá os valores de temperaturas nos nós avaliados. O algoritmo de Thomas é o mais adequado para a solução deste tipo de matriz. Para maiores detalhes sobre o algoritmo de Thomas podem ser consultados Ozisik, (1993) e Hoffman, (1992).



**Figura 2.21:** (A) as equações em  $x$  são resolvidas pelo método implícito e em  $y$  são resolvidas pelo método explícito, para cada valor de  $n$ . (B) as equações em  $y$  são resolvidas pelo método implícito e em  $x$  são resolvidas pelo método explícito, para cada valor de  $m$ . Adaptado de Wang e Chen (2003).

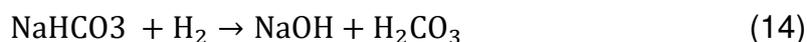
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

##### 3.1.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova para os ensaios utilizando o método do fio quente, foram produzidos com base na norma ISO 8894 (1990). Esta norma estabelece que as amostras devam ter a forma de paralelepípedos com dimensões mínimas de 200 mm x 100 mm x 50 mm (comprimento, largura e altura respectivamente) para este trabalho foram utilizados corpos de prova com as seguintes dimensões 230 mm x 114 mm x 90 mm. Para confecção das amostras foram utilizados moldes de madeira com uma placa de vidro na parte inferior com o objetivo de garantir que a superfície fosse totalmente plana. O próximo passo foi determinar a relação água/gesso, ou seja, a quantidade de água que seria adicionada a mistura (gesso + material criador de poros) para a produção os corpos de prova. Foram atribuídos 70% (em função do volume final do corpo de prova e da massa específica do gesso) da massa de gesso (2,48 Kg), para obter a massa de água empregada, desse modo à massa de água utilizada nas amostras foi de 1,74 Kg. Foram produzidas amostras com razões de massa de água e gesso iguais a 50%, 60% e 70%.

Para o aumento da porosidade dos corpos de prova para avaliação da influência sobre a condutividade térmica foi utilizado o bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), pois, este componente ao entrar em contato a água libera gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) de acordo com as seguintes equações 14 e 15:



O  $\text{NaOH}$  é uma base e se dissocia em  $\text{Na}^+$  e  $\text{OH}^-$ . O  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (ácido carbônico) é um ácido instável que logo reage formando:



Como resultado final da reação, temos água e gás carbônico que é liberado em forma de bolhas. Na mistura gesso/bicarbonato de sódio as bolhas ficam

aprisionadas dentro da estrutura do material, que após a secagem formam poros. Assim as amostras com de bicarbonato de sódio são mais porosas que as amostras sem de bicarbonato de sódio para a mesma relação água/gesso. A razão entre as massas de bicarbonato de sódio e gesso foi de 1%, ou seja, 24,86 g de  $\text{NaHCO}_3$ . A tabela 3.1 mostra as massas de água e bicarbonato de sódio e suas respectivas razões mássicas.

**Tabela 3.1:** razões mássicas utilizadas para a produção dos corpos de prova.

Componente da mistura	Porcentagem em relação à massa de gesso(%)	Massa em (Kg)
<b>Bicarbonato de sódio</b>	1%	0,02486
<b>Água</b>	70%	1,7402
	60%	1,4916
	50%	1,243

Para se produzir o corpo de prova com bicarbonato de sódio foram pesados 2,48 Kg de gesso, em um béquer, em uma balança digital. Depois foram pesados, também em um béquer, 1,74 Kg de água, 70% da massa de gesso, Em seguida a devida massa de bicarbonato de sódio (24,86 g) foi misturada com a massa de gesso em um agitador para garantir uma mistura bastante homogênea entre os dois sólidos. Após a mistura ser homogeneizada ela foi adicionada a água. Com um cronômetro foi marcado 1 minuto para despejar a mistura (gesso + bicarbonato de sódio) na água, em seguida foram cronometrados 2 minutos para a mistura se dissolver o máximo possível na água. Por último foi marcado 1 minuto para misturar o composto formado por gesso/bicarbonato de sódio e água. Nessa homogeneização já se percebe a formação das bolhas devido à liberação do gás carbônico. Assim o composto é depositado no molde e é esperado o seu endurecimento para o material ficar pronto e ser retirado do molde. O mesmo procedimento foi realizado para a produção das amostras apenas com água e gesso.

A norma ISO 8894 (1990) estabelece que a amostra analisada seja composta por dois corpos de prova. Dessa forma foram necessários dois corpos de prova por amostra analisada totalizando 60 (sessenta) corpos de prova, sendo 10 (dez) para

cada razão mássica com e sem a adição de bicarbonato de sódio. Um dos corpos de prova produzidos pode ser visto na figura 3.1



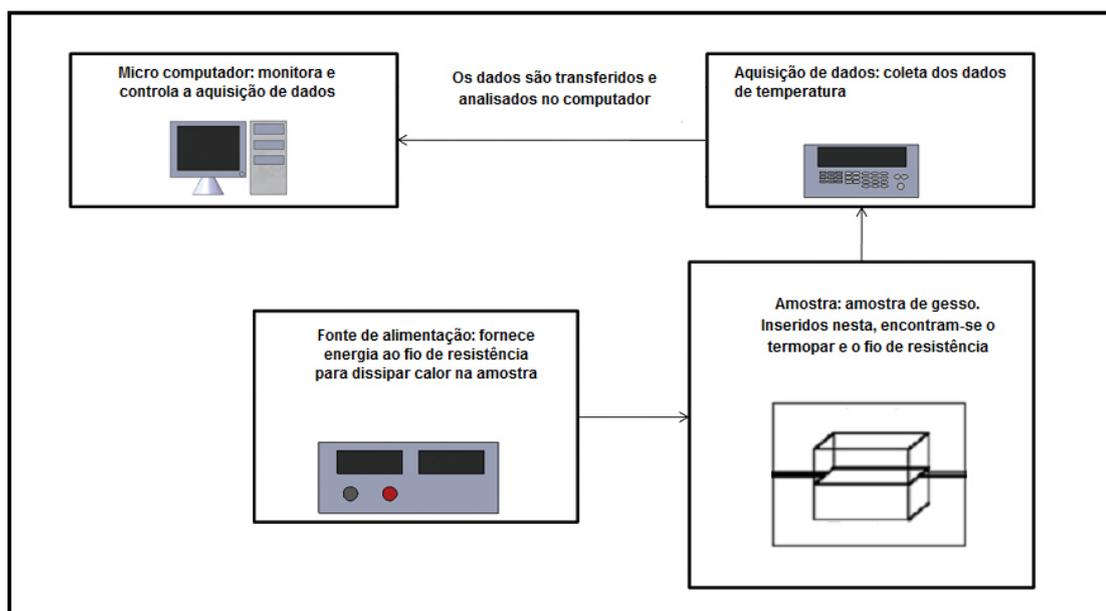
**Figura 3.1:** corpo de prova produzido para ensaio com o método do fio quente.

### **3.1.2 MONTAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PELO FIO QUENTE**

Para montagem do equipamento de fio quente foi utilizado um fio com resistência elétrica linear de  $4,75 \Omega/m$  com as seguintes dimensões: comprimento de 386 mm e 0,5mm de diâmetro. A resistência elétrica foi ligada a uma fonte de corrente contínua INSTRUTHERM FA-3003, para fornecer a potência necessária para as análises. A fonte empregada possui multímetros responsáveis pela leitura dos valores de corrente e tensão durante os testes.

A temperatura foi coletada através do uso de termopares tipo K (cromel-alumel). Para monitorar a temperatura o termopar foi conectado a um termômetro INSTRUTHERM TH-06, que possui um sistema de aquisição de dados permitindo assim a coleta e o armazenamento dos dados de temperatura. Os dados foram monitorados e transferidos para um computador utilizando o software 232 DATA LOGGER - LUTRON MENSURAMENT SYSTEM. A conexão do termômetro com o

computador foi estabelecida através da entrada serial RS-232 do termômetro e um adaptador USB-RS-232 utilizando um cabo com as conexões para as entradas citadas (USB e RS-232). A coleta os dados de temperatura foi realizada em intervalos de um segundo (1s) entre uma medida e outra. A figura 3.2 mostra uma ilustração da banca experimental. Na figura 3.3 é mostrada a bancada experimental utilizada neste trabalho.



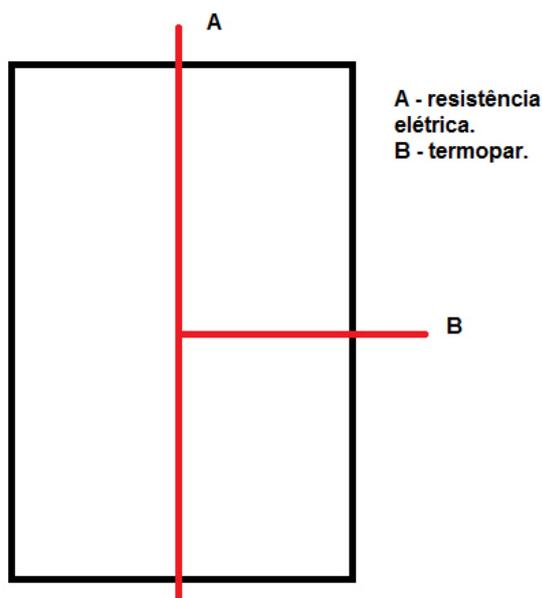
**Figura 3.2:** esquema ilustrativo da bancada experimental.



**Figura 3.3:** bancada experimental utilizada para os ensaios com o método do fio quente.

Utilizando um esquadro, um riscador e uma régua foram feitos dois canais perpendiculares entre si (figura 3.4) em uma das superfícies dos corpos de prova, onde foram colocados o termopar e a resistência elétrica, essa configuração permite

a medição da temperatura na superfície do fio da resistência elétrica. Os canais possuem diâmetro aproximado do termopar (diâmetro igual a 1 mm) e da resistência elétrica (diâmetro igual a 0,5mm). Após a colocação do termopar e da resistência elétrica os canais foram preenchidos com uma massa feita do próprio pó do material (gesso) misturado com dextrina (2% em relação à massa de gesso utilizada) e água, esse procedimento é recomendado pela norma ISO 8894 (1990). Em seguida outro bloco com a mesma razão mássica e mesma quantidade de bicarbonato de sódio foi colocado sobre o bloco no qual foram fixados o termopar e a resistência elétrica. Para permitir um melhor contato entre as amostras, estas foram pressionadas uma contra outra, utilizando para isso duas presilhas de aço SAE 1020. Em seguida o termopar foi conectado ao termômetro e esse ao computador para a aquisição e armazenamento de dados de temperatura, da mesma forma a fonte de alimentação foi conectada à resistência elétrica para permitir o aquecimento do fio.



**Figura 3.4:** esquema ilustrativo das posições dos canais na superfície do corpo de prova.

### 3.1.3 EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

O datalogger do termômetro foi configurado para coletar os dados de temperatura em intervalos de um segundo (1s) entre uma medida e outra, este intervalo foi utilizado devido à resolução do equipamento empregado. O armazenamento de dados foi iniciado simultaneamente com o acionamento da fonte de tensão, permitindo assim o aquecimento da resistência.

Os ensaios tiveram duração de 1260 s, esse tempo é sugerido pela ISO 8894 (1990) para a faixa de condutividade térmica do material avaliado. Os parâmetros dos ensaios são exibidos na tabela 3.2. A ISO 8894 (1990) também recomenda que sejam realizados no mínimo dois ensaios com cada amostra, sendo assim nesta etapa do trabalho foram feitos 120 ensaios de medição da condutividade térmica.

**Tabela 3.2:** parâmetros dos ensaios de medição de condutividade térmica.

Tempo de duração do ensaio (s)	Intervalo de medição de temperatura (s)	Resistência linear ( $\Omega/m$ )	Tensão (V)	Corrente elétrica (A)	Potência linear (W/m)
1260	1	4,75	5,3	3,0	42,75

### 3.1.4 AVALIAÇÃO DA POROSIDADE

A porosidade dos corpos de prova também foi verificada com o objetivo de avaliar o efeito da adição do bicarbonato de sódio durante a preparação da pasta de gesso. Para avaliação da porosidade primeiramente foi calculada a densidade dos corpos de prova de acordo com a equação 16:

$$d = \frac{m}{v} \quad (16)$$

Em que:  $d$  é a densidade em  $g/m^3$ ,  $m$  é a massa dos corpos de prova em g e  $v$  o volume dos corpos de prova em  $m^3$ . A massa dos corpos de prova foi determinada, com o auxílio de uma balança digital. O volume dos corpos de prova foi determinado pela equação 17:

$$v = a \cdot b \cdot c \quad (17)$$

Em que:  $a$ ,  $b$  e  $c$  são respectivamente o comprimento, a largura e a altura dos corpos de prova em  $m$ . Cada dimensão do corpo de prova foi medida, com um paquímetro, três vezes e então foi calculada a média de cada dimensão para em seguida ser determinado o volume de cada corpo de prova. Conhecendo os valores da massa e do volume de cada corpo de foi possível através da equação 16 determinar o valor da densidade de cada amostra.

A porosidade das amostras foi calculada segundo a densidade teórica do gesso, que é de 2,31 g/cm<sup>3</sup>. Para tal, faz-se um cálculo simples de percentagem em relação à densidade das amostras ( $d$ ).

A partir da densidade da amostra, a percentagem de porosidade foi calculada segundo a equação a seguir.

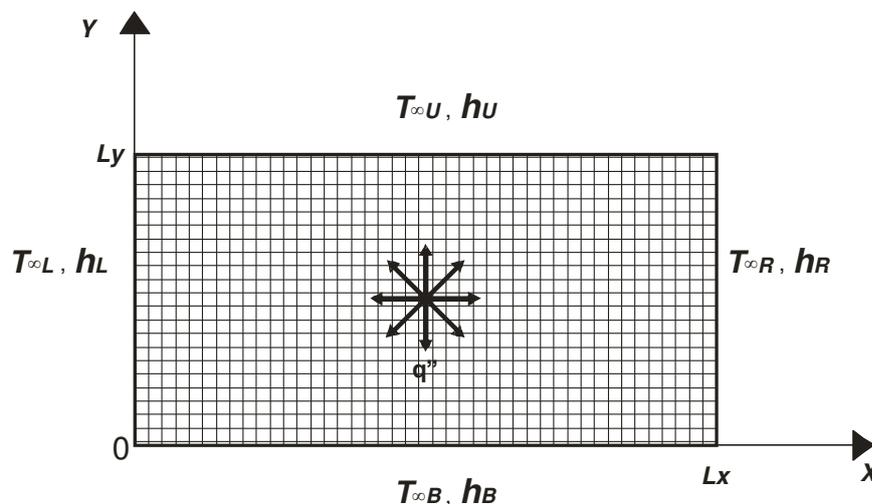
$$\% \text{ porosidade} = [1 - (d/2,31)].100 \quad (18)$$

## 3.2 MODELAGEM NUMÉRICA

### 3.2.1 MODELO FÍSICO

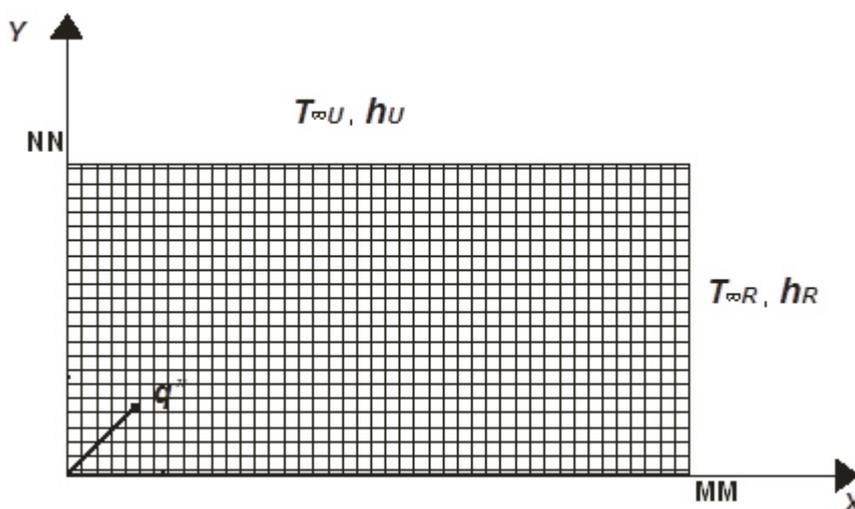
Foi realizada uma modelagem computacional com o objetivo de avaliar a distribuição temperatura para cada tipo de amostra produzida, e seus respectivos valores de condutividade térmica. O modelo numérico representa a condução de calor bidimensional em regime transiente que ocorre durante os testes utilizando o método do fio quente. Para isso, foi empregada a modelagem por diferenças finitas com solução através do método ADI, para determinar os perfis de temperatura.

O modelo físico que representa a montagem para os testes com o método do fio quente é mostrado na figura 3.5. Este modelo considera o fluxo de calor radial  $q''$  produzido pela resistência elétrica na interface de contato entre os corpos de prova, como também, as trocas de calor do corpo com o ar ambiente por convecção natural. O fluido possui uma temperatura  $T_{\infty}$  e um coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$ .  $L_x$  e  $L_y$  são respectivamente as dimensões horizontal e vertical da seção transversal do corpo de prova. Na figura 3.5 pode ser vista também a rede nodal que representa os pontos discretos, que foram utilizados para a dedução da aproximação das equações por diferenças finitas.



**Figura 3.5:** modelo físico dos corpos de prova durante o teste com o método do fio quente.

Devido à simetria do modelo físico, a modelagem matemática foi feita com base no modelo mostrado na figura 3.6. Dessa forma o problema é reduzido a apenas um quarto, representado pelo quadrante superior direito do modelo da figura 3.5. De forma que a convecção livre foi mantida para a superfície superior e também para a superfície direita. Já as superfícies esquerda e inferior foram modeladas como isoladas. O fluxo de calor foi adotado como sendo pontual. O número máximo de nós na direção horizontal e vertical, respectivamente são MM e NN.



**Figura 3.6:** modelo utilizado para dedução das equações de diferenças finitas.

### 3.2.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A formulação matemática utilizada para a simulação numérica foi baseada no modelo físico apresentado na figura 3.6. O equacionamento levou em consideração as seguintes características do problema: condução de calor bidimensional, regime transiente, propriedades do material constante, sem geração de calor. A solução do modelo matemático foi através do método ADI, que transformou o sistema de equações em uma matriz tri-diagonal, que por sua vez foi resolvida pelo algoritmo de Thomas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DA DENSIDADE DAS AMOSTRAS

Após a produção de todos os corpos de prova foram verificados os valores de densidade média e porosidade média de cada relação gesso/água. Primeiramente serão observados na tabela 4.1, os valores médios e seus respectivos desvios padrão, para estas propriedades.

**Tabela 4.1:** valores médios de porosidade e de densidade média para cada razão água/gesso.

Razão água/gesso	Bicarbonato de Sódio NaHCO <sub>3</sub> (%)	Porosidade média (%)	Densidade média (g/cm <sup>3</sup> )
70%	0	53,26±0,56	1079,77±12,77
	1	64,15±0,73	828,06±16,94
60%	0	49,00±0,37	1177,90±8,63
	1	60,57±0,70	910,73±16,06
50%	0	42,58±0,90	1326,37±20,75
	1	55,58±1,89	1026,12±43,65

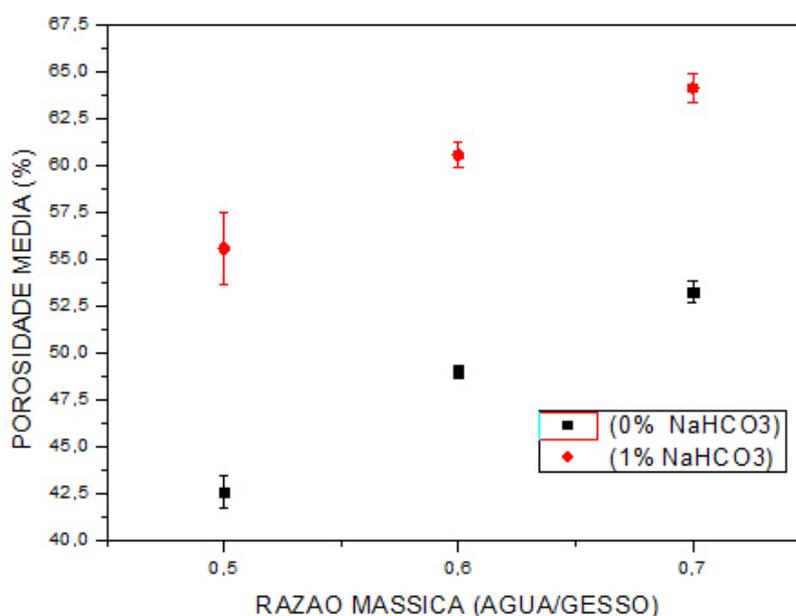
O processo de cristalização do gesso é diretamente influenciado pela relação água/gesso, pois, neste ocorre à cristalização da fase dihidratada (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), que é termodinamicamente mais estável, e a cristalização da fase hemihidratada (CaSO<sub>4</sub>.0,5H<sub>2</sub>O). De forma que independentemente do volume de água empregado no preparo da pasta, todo o hemihidrato utilizado é convertido em dihidrato e a quantidade de água em excesso fica aprisionada na estrutura do material. Como resultado da secagem dos corpos de gesso, os poros são formados pela evaporação da água, logo quando maior a quantidade de água livre após o processo de cristalização maior será o número de poros formados. Assim quanto maior a relação água/gesso maior o será a porosidade das amostras.

A figura 4.1 mostra a porosidade média em função das razões mássicas água/gesso utilizadas. Pela análise da figura 4.1 nota-se que as amostras com 1% de NaHCO<sub>3</sub> apresentaram maior porosidade média em relação às amostras com mesma razão água/gesso, porém, sem adição de NaHCO<sub>3</sub>.

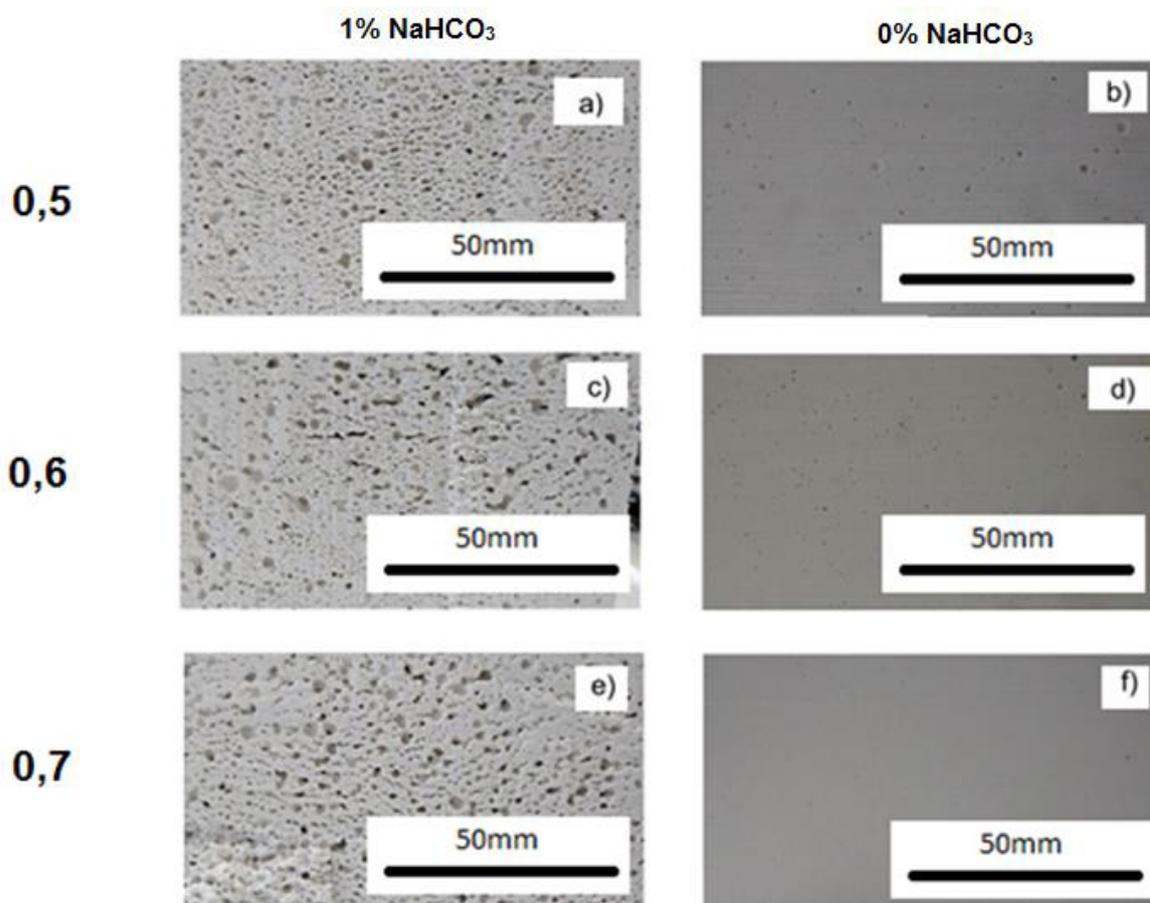
Entre as amostras com 1% de NaHCO<sub>3</sub>, os corpos com razões iguais a 0,6 e 0,7 apresentaram um aumento em sua porosidade mais acentuado em comparação com os corpos de prova de razão 0,5. Sendo que o maior valor médio de porosidade

foi apresentado pelas amostras com de razão água/gesso igual a 0,7, seguidas pelas amostras de razão igual a 0,6.

Entre as amostras sem bicarbonato de sódio a razão água/gesso com menor porosidade média foi a razão igual a 0,5 e entre os corpos de prova com adição de bicarbonato de sódio foi também a razão água/gesso igual a 0,5, estas amostras também apresentaram as menores reduções na densidade média. No primeiro caso, o baixo valor da porosidade é resultado da menor quantidade de água utilizada no preparo dos corpos de prova quando comparada com as outras razões. Já para as amostras com  $\text{NaHCO}_3$  a quantidade de água usada e o bicarbonato de sódio influenciam na formação de poros conforme pode ser visto na figura 4.2.



**Figura 4.1:** porosidade média em função da razão água/gesso utilizada.



**Figura 4.2:** Morfologia da superfície das cerâmicas de gesso bi hidratados obtidos com diferentes relações água/gesso e diferentes massas de  $\text{NaHCO}_3$ . a) 1%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,5. b) 0%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,5. c) 1%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,6. d) 0%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,6. e) 1%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,7. f) 0%  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/ gesso igual a 0,7.

Os maiores valores de porosidade para cada razão água/gesso são mostrados na tabela 4.2.

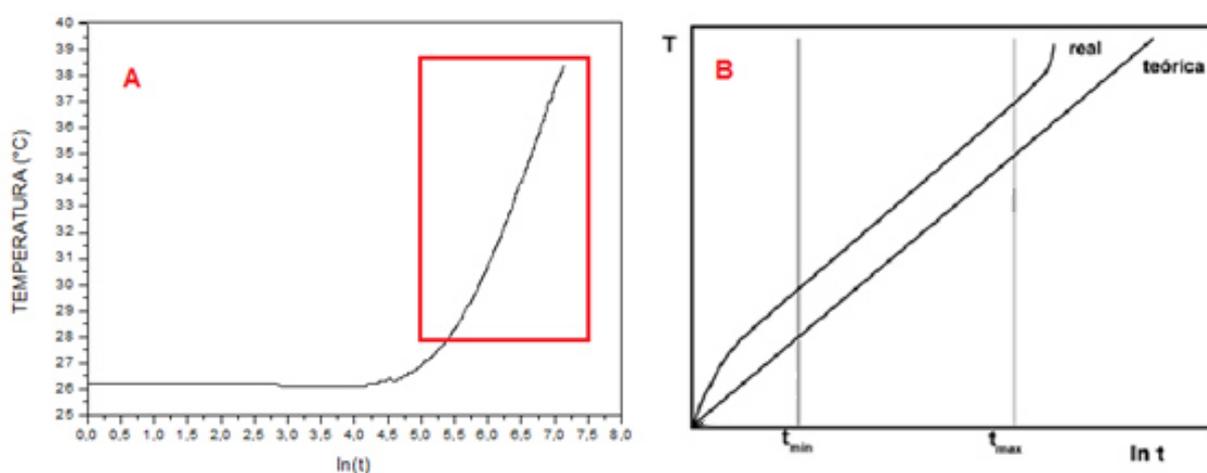
**Tabela 4.2:** maiores valores de porosidade para cada razão água/gesso utilizada.

Razão (água/gesso)	Bicarbonato de Sódio $\text{NaHCO}_3$ (%)	Porosidade(%)
70%	0	53,97
	1	65,23
60%	0	49,75
	1	62,31
50%	0	44,17
	1	57,67

De acordo com a tabela 4.2 o maior valor de porosidade foi de 65,23% obtido com a razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ . O valor mínimo de porosidade foi apresentado pelas amostras com razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ , que foi de 44,17%.

## 4.2 ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Para realizar os cálculos da condutividade térmica primeiramente foram produzidos gráficos da temperatura em função do logaritmo natural do tempo (figura 4.3-A) com o objetivo de determinar a inclinação do trecho da curva no qual a relação entre a temperatura e o  $\ln t$  é linear, pois, apenas nessa região as curvas teórica e real são semelhantes (figura 4.3-B).



**Figura 4.3:** A) gráfico da temperatura em função do  $\ln(t)$  para a razão mássica de 70% com 1% de bicarbonato de sódio, em destaque está o trecho no qual a relação entre a temperatura e o  $\ln t$  é linear. B) As curvas teóricas e reais da temperatura como uma função de tempo.

Para o cálculo do coeficiente angular  $\tau$  foi utilizada a equação 19, A seguir, e com o valor de  $\tau$  conhecido para cada curva foi possível através da equação 8 determinar a condutividade térmica para cada amostra analisada.

$$\tau = \frac{\ln(t_1/t_2)}{T(r,t) - T_0} \quad (19)$$

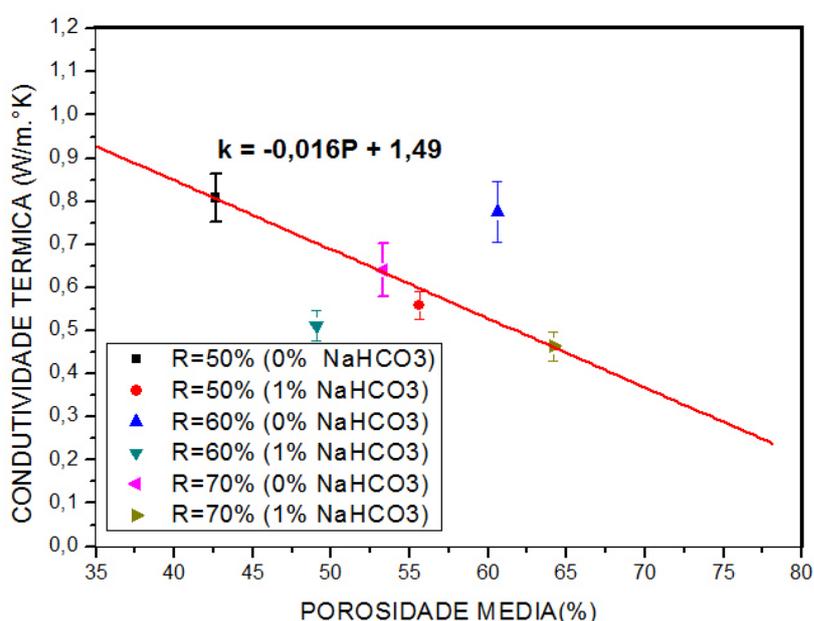
Em que  $T(r, t)$  é a temperatura no ponto  $r$  no instante  $t$ ,  $T_0$  é a temperatura inicial e  $t$  tempo contado a partir da liberação de calor

Os valores médios e o desvio padrão da condutividade térmica e da massa específica para cada razão água/gesso são mostrados na tabela 4.3 a seguir.

**Tabela 4.3:** Valores médios de condutividade térmica para cada razão água/gesso.

Razão água/gesso	Bicarbonato de Sódio NaHCO <sub>3</sub> (%)	Condutividade térmica média (W/m.K)	Massa específica média (kg/m <sup>3</sup> )
70%	0	0,64±0,06	1079,77±12,77
	1	0,47±0,03	828,06±16,94
60%	0	0,78±0,07	1177,908±8,61
	1	0,51±0,03	910,73±16,06
50%	0	0,81±0,06	1326,37±20,75
	1	0,56±0,03	1026,12±43,65

Para a faixa de valores analisada pode ser visto que a condutividade térmica variou linearmente com o aumento da porosidade, conforme mostrado na figura 4.4. Utilizando a equação da reta de ajuste é possível estimar qual o valor máximo e mínimo da condutividade térmica média e seus respectivos valores de porosidade.

**Figura 4.4:** condutividade térmica média em função da porosidade média e reta que representa a relação entre a condutividade térmica média e porosidade média.

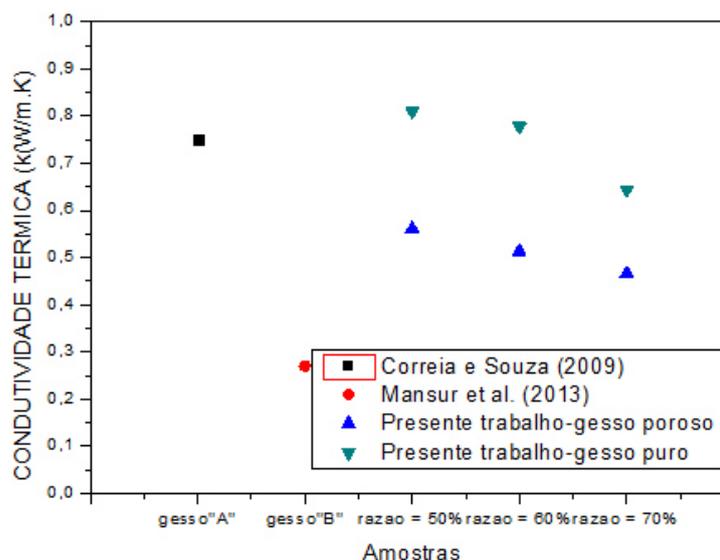
O maior valor de condutividade térmica média estimado através da equação da reta de ajuste é de 1,49 W/m.K para um corpo de prova livre de porosidade, enquanto que o valor mínimo da condutividade térmica média é de 0,01 W/m.K para uma amostra com 92,5% de porosidade média. Os valores da condutividade térmica

média estimados para valores de porosidade média acima de 92,5%, são negativos, tais valores são fisicamente impossíveis, logo, o menor valor da condutividade térmica média considerado foi de 0,01 W/m.K.

Assim a equação  $y = -0,016x + 1,49$ , obtida por regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados, pode ser utilizada na determinação da porosidade média quando se conhece a condutividade térmica média necessária para certa aplicação de isolamento térmico. E dessa forma é possível determinar a razão água/gesso utilizada na produção dos corpos de gesso.

Adotando os valores 1,49 W/m.K e 0,01 W/m.K, respectivamente, como limites máximo e mínimo de condutividade térmica para corpos de gesso poroso, é possível estabelecer um critério para identificação de materiais com valores da mesma propriedade térmica dentro deste intervalo. Este critério tem como objetivo selecionar os materiais cerâmicos, que são empregados como isolantes em construções civis e verificar a viabilidade de uma possível troca pelo gesso com bicarbonato de sódio. Porém, deve-se observar a porosidade dos corpos de prova produzidos a partir do gesso com bicarbonato de sódio, pois, esta afeta diretamente as propriedades mecânicas o que pode impossibilitar o uso do material. Logo uma relação de equilíbrio entre a porosidade, condutividade térmica e propriedades mecânicas deve ser bem determinada.

Os resultados obtidos no presente trabalho são comparados com os resultados de Mansur (2013) e Correia e Souza (2009) que utilizando a técnica de fio quente determinaram a condutividade térmica de corpos de gesso maciços (figura 4.5). Pela análise da figura 4.5 nota-se que os resultados obtidos no presente trabalho para as três razões água/gesso sem a adição de  $\text{NaHCO}_3$  estão próximos ao obtido por Mansur (2013) sendo que a condutividade térmica para razão água/gesso igual a 70% sem  $\text{NaHCO}_3$  é a menor. A condutividade térmica obtida por Correia e Souza (2009) é inferior aos valores obtidos no presente trabalho. Comparando os valores da condutividade térmica das amostras com 1% de  $\text{NaHCO}_3$  com o resultado de Mansur (2013) percebe-se que as amostras porosas apresentam menor condutividade térmica que as amostras sem bicarbonato de sódio. Isto demonstra que o presente estudo está em acordo com os procedimentos empregados no uso do método do fio quente. O que reforça a ideia de aplicação do gesso com adição de bicarbonato de sódio para isolamento térmico.



**Figura 4.5:** Comparação dos valores de condutividade térmica, obtidos através do fio quente com dados da literatura.

Silva (2012) estudou a influência da porosidade sobre a resistência mecânica de corpos de gesso. Utilizando as seguintes razões água/gesso: 0,5; 0,6 e 0,7, o autor avaliou o comportamento da resistência à compressão ( $\sigma_c$ ) de amostras de gesso com 0% e 1% em massa de  $\text{NaHCO}_3$  (relação à massa de gesso). A tabela 4.4 contém os valores de resistência à compressão de porosidade para as amostras estudadas por Silva (2012).

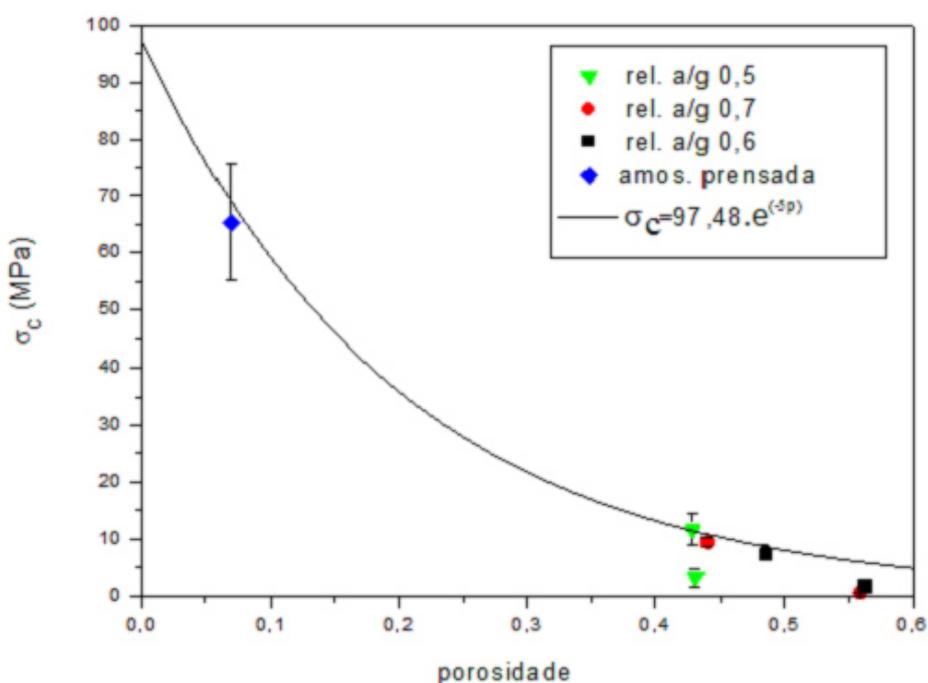
**Tabela 4.4:** Resistências à compressão e porosidade dos corpos porosos obtidos em todas as relações água/gesso Fonte: Silva, 2012.

Bicarbonato de Sódio $\text{NaHCO}_3$ (%)	Relação água/gesso					
	0,5		0,6		0,7	
	$\sigma_c$ (MPa)	Porosidade (%)	$\sigma_c$ (MPa)	Porosidade (%)	$\sigma_c$ (MPa)	Porosidade (%)
<b>0</b>	11,56±2,72	42,93±0,92	7,55±1,36	48,39±0,59	9,41±0,95	44,01±1,11
<b>1</b>	3,15±1,52	43,13±2,94	1,81±0,17	56,18±1,38	0,54±0,09	55,87±1,23

Pela análise dos dados apresentados na tabela 4.4, nota-se que os maiores valores de  $\sigma_c$  foram atingidos para as amostras com razão água/gesso de 0,5, sendo

$11,56 \pm 2,72$  MPa para as amostras com 0% de  $\text{NaHCO}_3$  e  $3,15 \pm 1,52$  MPa para as amostras com 1% de  $\text{NaHCO}_3$ . Já os corpos de prova com as razões água/gesso de 0,6 e 0,7, tanto com 0% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$  apresentaram os menores valores de resistência a compressão. Estes resultados são justificados pelo aumento da porosidade das amostras com razões água/gesso de 0,7 e 0,6, outros fatores que têm grande influência sobre a redução de  $\sigma_c$  são o aumento da quantidade água usada no preparo da pasta de gesso e a adição do bicarbonato de sódio.

Silva (2012) demonstrou o decaimento da resistência à compressão com o aumento da porosidade das amostras estudadas. Esta relação apresenta um comportamento exponencial, que pode ser observado na figura 4.6. O autor também utilizou amostras prensadas com porosidade média  $6,901 \pm 2,21$ , como referência para esta análise.



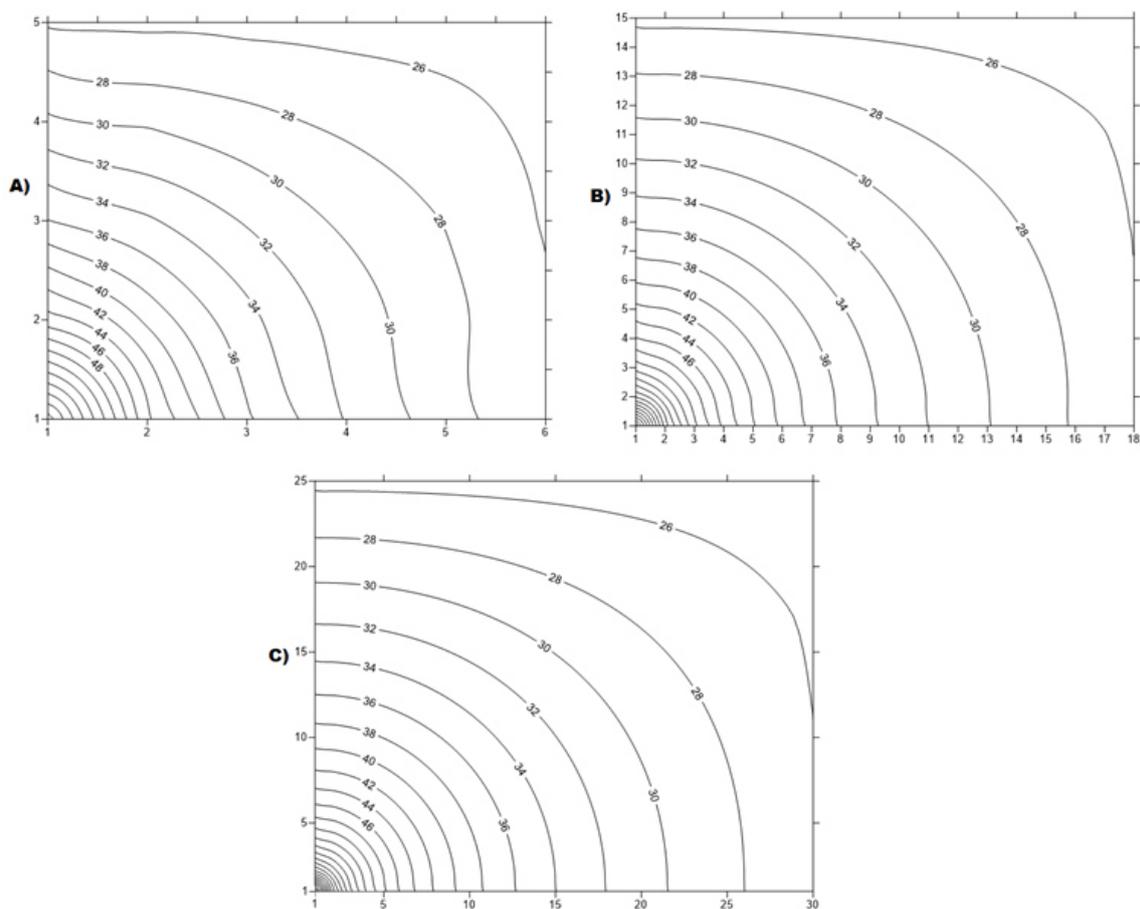
**Figura 4.6:** gráfico da tensão de compressão x porosidade para os corpos produzidos. Fonte: Silva 2012.

Para se determinar um valor adequado para a razão água/gesso que combine boas características mecânicas e de isolamento térmico, comparamos os valores obtidos no presente trabalho com os resultados obtidos por Silva (2012). Para as

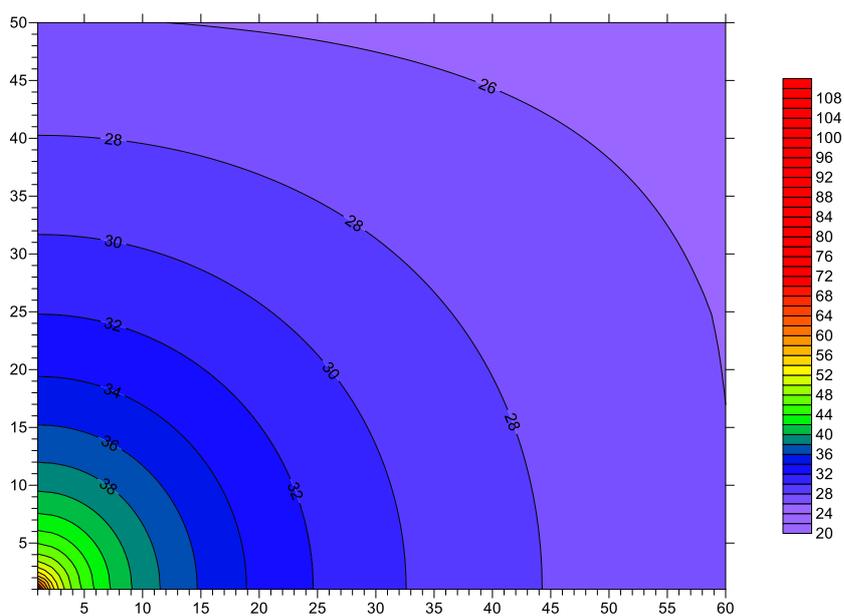
amostras com 1%  $\text{NaHCO}_3$ , a razão água/gesso que apresenta a melhor combinação de propriedades foi a razão água/gesso igual a 0,5 com os valores médios de  $\sigma_c$  e de  $k$  respectivamente iguais a  $3,15 \pm 1,52$  MPa e  $0,56 \pm 0,03$  W/m.K, já as amostras com 0%  $\text{NaHCO}_3$  a combinação mais adequada é apresentada pela razão água/gesso igual a 0,7 com os seguintes valores:  $\sigma_c$  igual à  $9,41 \pm 0,95$  MPa e  $k$  igual à  $0,64 \pm 0,06$ . Contudo é necessário determinar quais serão as solicitações as quais os corpos de gesso com porosidade alterada estarão submetidos, para se ter uma melhor combinação entre as propriedades térmicas e mecânicas.

### 4.3 PERFIS DE TEMPERATURA

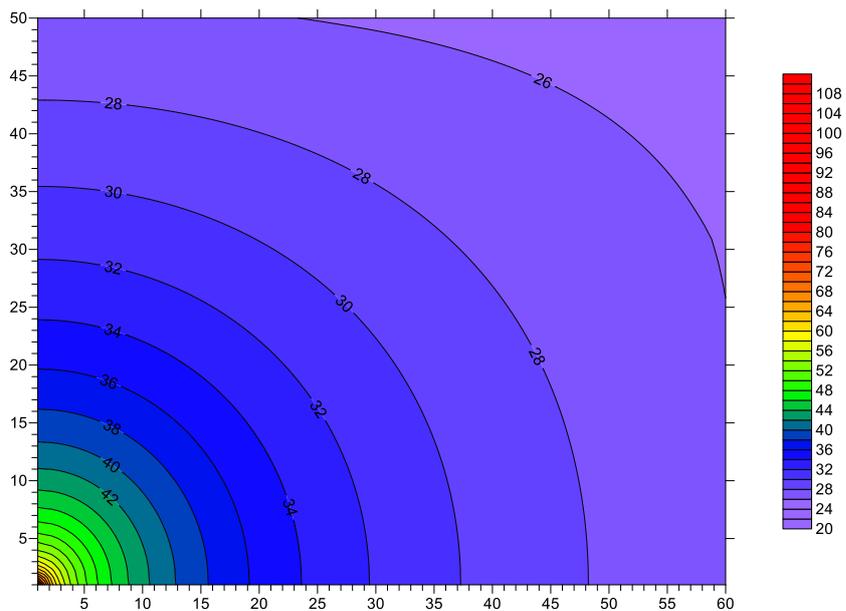
Alguns parâmetros foram estabelecidos para a realização da simulação numérica. As dimensões  $L_x$  e  $L_y$  adotadas são respectivamente 0,057 m e 0,045 m, já que o modelo utilizado na configuração possui metade das dimensões horizontal e vertical. A taxa de calor linear, liberada pela resistência elétrica do fio quente, foi de 9,833 W/m. O tempo que simula a duração dos testes para medição da condutividade térmica foi de 1260 s e o intervalo de tempo  $\Delta t$  foi igual a 1 s. O valor do calor específico adotado para os cálculos foi 0,837 (J/kg.K) fornecido por Frota e Schiffer (2001). A malha utilizada possui 60 nós horizontais e 50 nós verticais. Para a escolha dessa malha foi feita uma análise de convergência de malhas, na figura 4.7, é possível observar os perfis de temperatura gerados com malhas menos refinadas. Os valores médios de condutividade térmica e de densidade, apresentados na tabela 4.3, foram juntamente com o valor que Frota e Schiffer (2001) consideram para o calor específico do gesso, usados como dados de entrada para a simulação computacional. Dessa forma, foram plotados os perfis de temperatura para cada razão água/gesso em função dos dados apresentados na tabela 4.3. Os perfis de temperatura são mostrados nas figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13.



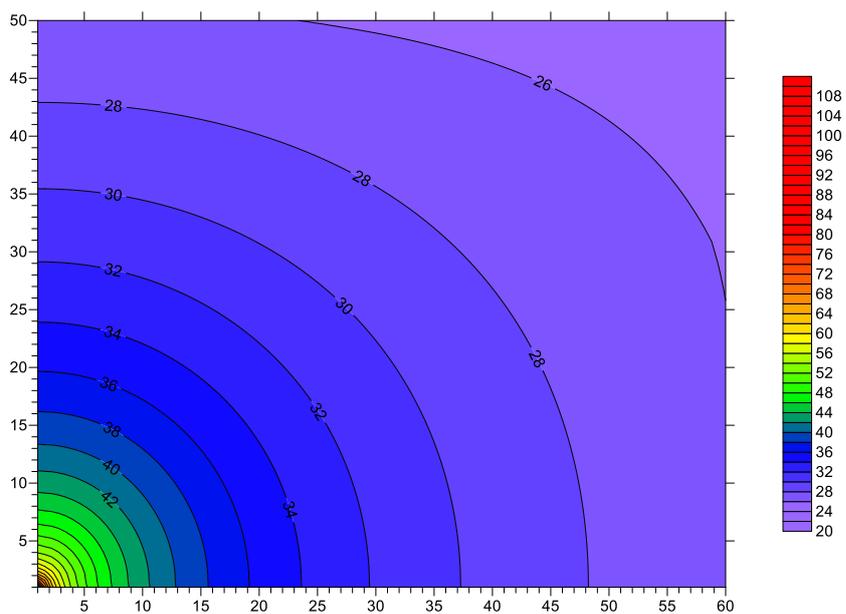
**Figura 4.7:** Perfis de temperatura gerados para análise de convergência de malhas. Perfil gerado com malhas de 6 x 5 (figura 7.7A), 18 x 15 (figura 7.7B) e 30 x 25 (figura 7.7C).



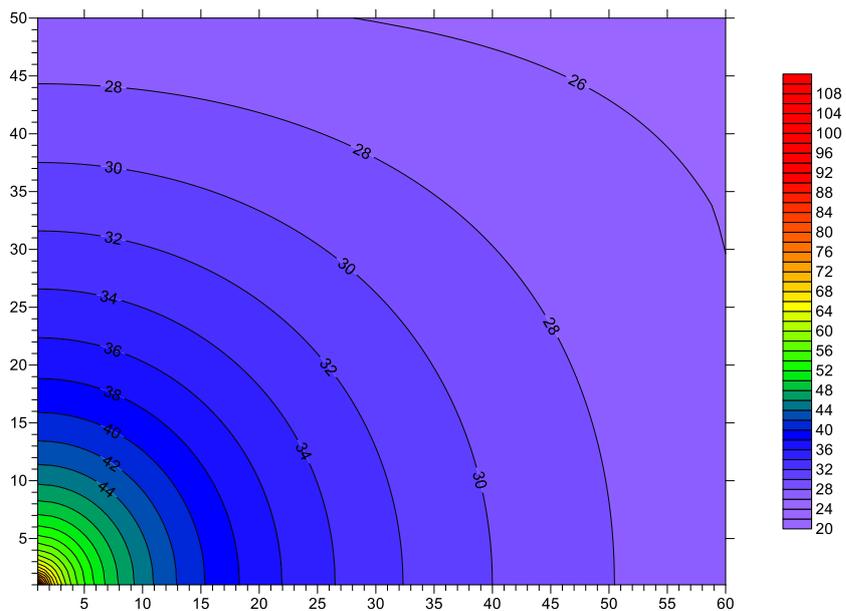
**Figura 4.8:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ .



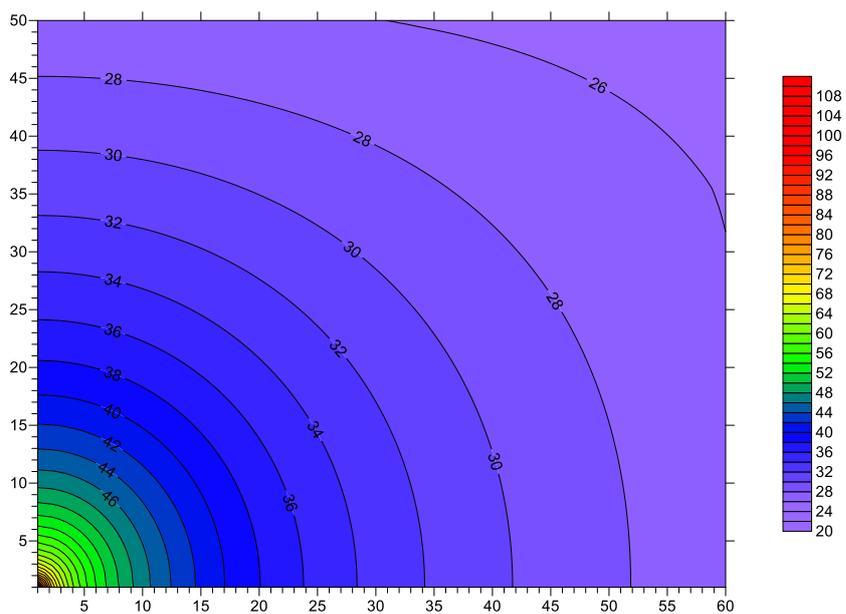
**Figura 4.9:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 60% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ .



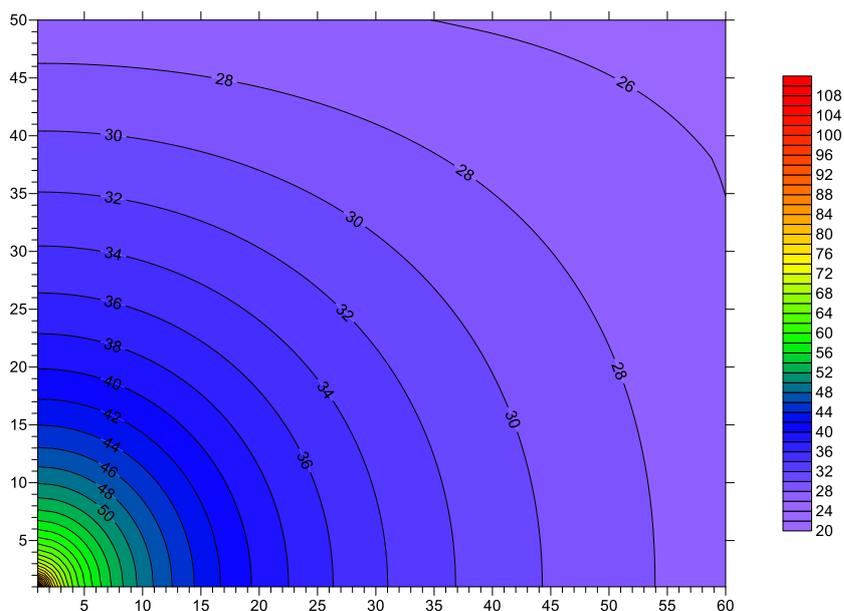
**Figura 4.10:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 70% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ .



**Figura 4.11:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 50% e 1% de NaHCO<sub>3</sub>.



**Figura 4.12:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 60% e 1% de NaHCO<sub>3</sub>.



**Figura 4.13:** Perfil de temperatura gerado com base nos valores médios de condutividade térmica e massa específica para as amostras com razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ .

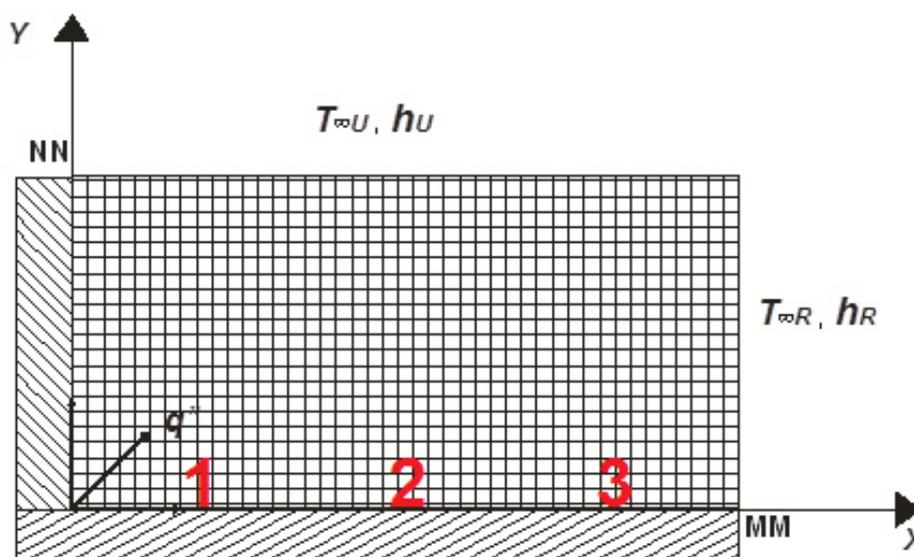
Para as amostras que com 0% de  $\text{NaHCO}_3$  (figuras 4.8, 4.9, 4.10) a quantidade de água é o fator de principal influência sobre a formação de poros e conseqüentemente sobre a redução da condutividade térmica. Esta influência pode ser notada pelo deslocamento das isotermas para direita, causada pela redução do valor médio da condutividade térmica. Isto implica que os pontos mais próximos da fonte de calor possuem maiores valores de temperatura, pois, o fluxo de calor encontra uma maior dificuldade de propagação. Já que a condutividade térmica, dos corpos de prova, foi reduzida pelo aumento da porosidade causada devido à elevação da razão água/gesso. Logo, as amostras com razão água/gesso igual a 70% (figura 4.10) e sem bicarbonato de sódio apresentaram maiores temperaturas nas regiões analisadas, quando comparadas com as amostras com razões água/gesso de 50%(figura 4.8) e 60% (figura 4.9). Os corpos de prova com razões de 50% e 60% apresentaram resultados semelhantes.

Além da quantidade de água utilizada para a produção das amostras, o emprego do bicarbonato de sódio (1% em massa), afeta diretamente os valores de condutividade térmica, obtidos experimentalmente. A análise dos perfis de temperatura para as amostras com 1% de  $\text{NaHCO}_3$  (figuras 4.11, 4.12, 4.13), mostra que as amostras com razão água/gesso igual a 70% (figura 4.13) ofereceram uma maior resistência à propagação do fluxo de calor, devido a redução da condutividade

térmica causada pela adição do bicarbonato de sódio durante a preparação das amostras. As mostras com razões água/gesso iguais a 50% (figura 4.11) e 60% (figura 4.12) apresentaram temperaturas maiores, para as mesmas regiões analisadas, quando comparadas com as temperaturas das amostras com mesma razão água/gesso, porém, sem bicarbonato de sódio. Este fato confirma que o aumento da porosidade reduz a condutividade térmica do material.

Um fator que deve ser observado é a influência da difusividade térmica  $\alpha$ , já que ela indica a velocidade na qual o calor é conduzido no interior do material. Esta propriedade térmica depende diretamente de outras três propriedades, sendo elas: a condutividade térmica  $k$ , a massa específica  $\rho$  e o calor específico  $c_p$ . As duas primeiras foram determinadas experimentalmente neste trabalho, porém, o calor específico utilizado na simulação numérica foi retirado da literatura. Isso acaba influenciando a distribuição de temperatura. Contudo os valores de  $k$ , foram determinados de maneira correta e segura através do método do fio quente, como também, os valores de  $\rho$  foram coletados de forma adequada, o que acaba compensado à ausência de valores experimentais para  $c_p$ .

Foram colocados três termopares na superfície do corpo de prova, para coletar os dados de temperatura em diferentes pontos das amostras durante os ensaios. Os termopares foram posicionados nos pontos 1, 2 e 3, localizados a 15 mm, 30 mm e 45 mm de distância respectivamente da fonte de calor (fio quente). O posicionamento dos termopares pode ser observado na figura 4.14. As medidas foram feitas nas amostras que apresentaram o valor máximo de porosidade (65,23% e para a razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ ) e o valor mínimo de porosidade (44,17% e para a razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ).



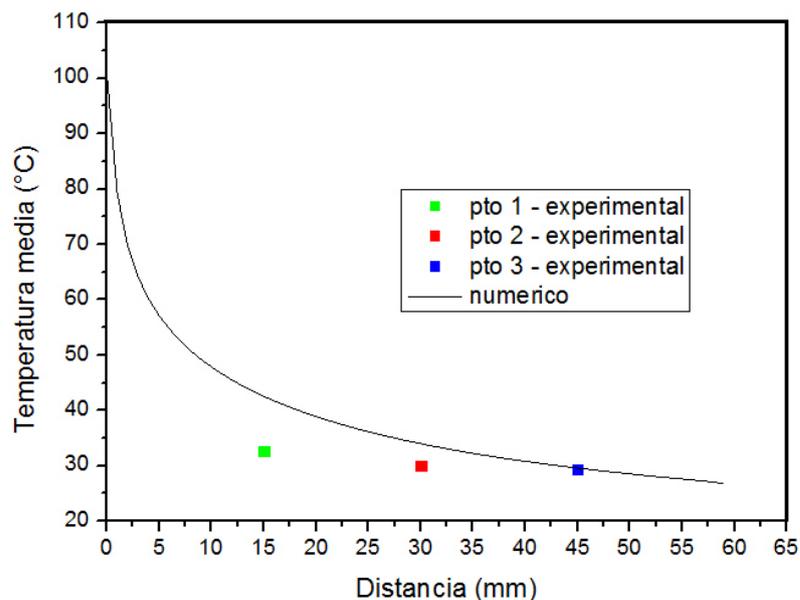
**Figura 4.14:** posicionamento dos termopares para coleta de dados de temperatura em diferentes pontos dos corpos de prova.

Após a realização de dois ensaios por amostra, foram calculadas as médias e os desvios padrão das temperaturas para cada amostra. Os valores médios de temperatura podem ser vistos na tabela 4.5.

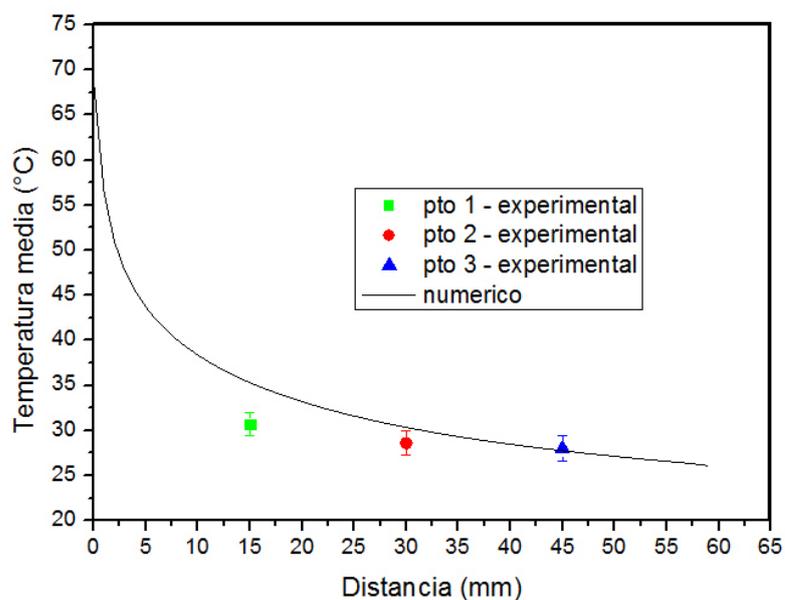
**Tabela 4.5:** temperaturas médias dos pontos selecionados nas amostras com razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$  e razão água/gesso de 50% sem adição de bicarbonato de sódio.

Distância (mm)	Temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	Razão água/gesso de 70% e 1% de $\text{NaHCO}_3$	Razão água/gesso de 50% e 0% de $\text{NaHCO}_3$
15	$32,70 \pm 0,30$	$30,70 \pm 1,30$
30	$30,00 \pm 0,20$	$28,60 \pm 1,30$
45	$29,40 \pm 0,10$	$28,00 \pm 1,40$

Os valores médios de temperatura resultantes da coleta de dados nos três pontos referenciados anteriormente foram comparados com os valores de temperatura nos mesmos pontos, porém, resultantes da simulação numérica. A comparação dos resultados experimentais e numéricos pode ser vista nas figuras 4.15 e 4.16.



**Figura 4.15:** comparação entre os valores médios de temperaturas experimentais e numéricos nos pontos 1, 2 e 3, para as amostras com porosidade de 65,23% (razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ ).



**Figura 4.16:** comparação entre os valores médios de temperaturas experimentais e numéricos nos pontos 1, 2 e 3, para as amostras com porosidade de 44,17% (razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ).

Ao analisarmos as figuras 4.15 e 4.16, observamos que em ambas as amostras a temperatura experimental nos pontos 1, 2 e 3 são menores que as temperaturas numéricas nas mesmas posições. A diferença entre as temperaturas experimental e

numérica é mais acentuada na amostra com porosidade de 65,23% (razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ ), isto se explica pelo fato de que a quantidade de água utilizada é maior, o que resulta em um número maior de poros formados, o que acaba reduzindo a condutividade térmica da amostra. Outro fator importante é que o modelo computacional utilizado neste trabalho considera apenas a influência da porosidade sobre a redução da condutividade térmica e não a influência geométrica dos poros formados, e assim, gerando uma resistência à propagação do fluxo de calor ao longo da amostra. Ao analisarmos a figura 4.16 notamos que a influência geométrica dos poros sobre a temperatura experimental não é tão acentuada como é observado na figura 4.15. Isto é explicado, pelo fato de que a quantidade de poros formados na amostra com porosidade de 44,17% (razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ) é bastante reduzida, já que a quantidade de água utilizada na produção dos corpos de prova é menor. Notamos também ao analisarmos as figuras 4.15 e 4.16, a resistência encontrada pelo fluxo de calor para se propagar na amostra. Isso é evidenciado, quando observamos os valores de temperaturas para os mesmos pontos. Estes valores para a amostra com porosidade de 65,23% (razão água/gesso de 70% e 1% de  $\text{NaHCO}_3$ ), são maiores do que os valores para os mesmos pontos na amostra com porosidade de 44,17% (razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ), ou seja, no primeiro corpo de prova devido a condutividade térmica ser menor, o fluxo de calor se propaga com maior dificuldade, assim a onda de calor leva mais tempo para se afastar da região, e por isso a temperatura nos pontos analisados é superior às temperaturas nas amostras com porosidade de 44,17% (razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ). Nas amostras com porosidade de 44,17% (razão água/gesso de 50% e 0% de  $\text{NaHCO}_3$ ), o fato de a condutividade térmica ser maior facilita a propagação do fluxo de calor, ou seja, a onda de calor se afasta mais rapidamente o que impede que a temperatura no ponto se eleve.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos pode-se concluir que:

O bicarbonato de sódio, na razão de 1% em massa, mostrou-se um aditivo eficiente para a produção de corpos de gesso porosos. As amostras preparadas com a adição de  $\text{NaHCO}_3$  apresentaram valores de porosidade média maiores do que os valores referentes as amostras sem bicarbonato de sódio.

O arranjo experimental do método do fio quente montado neste trabalho mostrou-se eficaz para determinação da condutividade térmica, por ser uma técnica de fácil aplicação análise de dados simples, além de direta e precisa. Dessa forma ratificando a viabilidade da realização de testes para a medição da condutividade térmica de materiais cerâmicos com um arranjo simples, barato e seguro.

O aumento da porosidade causado pela adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ) afeta diretamente a condutividade térmica dos corpos de gesso, de modo que quanto maior a porosidade menor o valor da condutividade térmica, permitindo assim, a possível aplicação de corpos de gesso com a porosidade alterada pela adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), como isolante térmico de ambientes interiores e dessa forma reduzindo o consumo de energia elétrica, para se atingir a condição de conforto térmico por meio do uso de condicionadores de ar.

A comparação dos dados de propriedades mecânicas obtidos da literatura com os valores de condutividade térmica permitiu determinar qual a são as melhores razões água/gesso que combinam as características mais adequadas relacionadas à resistência mecânica e ao isolamento térmico. Sendo assim, para as amostras com 1% de  $\text{NaHCO}_3$ , a razão água/gesso igual a 0,5 foi a selecionada e para as amostras com 0% de  $\text{NaHCO}_3$  a razão água/gesso igual a 0,7 foi identificada como melhor alternativa.

Outras vantagens desses dois materiais (gesso e bicarbonato de sódio) são: o baixo custo, a facilidade de preparação das amostras, rapidez e aplicação.

O método de diferenças finitas mostrou-se eficaz para a modelagem computacional da condução de calor nos corpos de gesso com porosidade alterada. Através dos perfis de temperatura produzidos por meio da simulação numérica, pode-se observar a influência da condutividade térmica sobre a propagação do fluxo de calor no material. Esta propriedade térmica, quando reduzida pelo aumento do

número de poros ,resultado da adição de  $\text{NaHCO}_3$ , causou uma maior dificuldade no aumento da temperatura das regiões mais distantes da fonte de calor, quando comparadas as mesmas regiões das amostras sem bicarbonato de sódio. Logo, o modelo numérico utilizado demonstrou a eficiência do uso de corpos de gesso com porosidade alterada pela adição de  $\text{NaHCO}_3$  como material isolante de ambientes interiores.

## 6 PERSPECTIVAS

- Realizar testes de medição de outras propriedades térmicas dos corpos de gesso produzidos com a adição de bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$ ), como calor específico e a difusividade térmica;
- Realizar uma modelagem computacional, tomando como base os valores de calor específico, massa específica, condutividade térmica e difusividade térmica, obtidos experimentalmente;
- Identificar outros aditivos de baixo custo para produção de corpos de gesso porosos;
- Verificar a viabilidade econômica da produção de corpos de gesso poroso para isolamento térmico em larga escala.
- Realizar ensaios de desempenho térmico dos corpos de prova de gesso poros para, avaliar o seu desempenho como isolante térmico;
- Avaliação das propriedades acústicas dos corpos de gesso com porosidade alterada pelo uso de bicarbonato de sódio, para isolamento acústico.
- Investigar os esforços aos quais estarão submetidos os corpos de gesso poroso empregados em sistemas de isolamento térmico.

## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 15220-1/2005, Desempenho térmico de edificações – Parte 1: Definições, Símbolos e unidades**. Rio de Janeiro-RJ, 2005a.
- ANBALAGAN, G. et al. **Infrared, optical absorption, and EPR spectroscopic studies on natural gypsum**. *Vibrational Spectroscopy*, v. 50, n. 2, p. 226-230, 2009.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING. **Norma 55/2004: Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2004.
- ATHIENITIS, A. K. et al. **Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage**. *Building and environment*, v. 32, n. 5, p. 405-410, 1997.
- ANTUNES, R.N.P. **Estudo da influencia da cal hidratada nas pastas de gesso**. 1999.145 f. São Paulo. Dissertação (Mestrado em engenharia civil), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ARANHA, I. B.; OLIVEIRA, C. H.; **Caracterização mineralógica de minérios brasileiros de gipsita**. XIX ENTMME – Recife, PE, Brasil, Novembro de 2002
- **BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B.**; Gipsita. Comunicação técnica elaborada para edição do livro *rochas & minerais industriais: usos e especificações*. Pág. 449 a 470, Rio de Janeiro, 2005.
- BARBERO, Silvia et al. **Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison**. *Energy and buildings*, v. 77, p. 40-47, 2014.
- BARBOSA, A.A. **Estudo da conversão química de compósitos a base de gesso em hidroxiapatita**. 2012. 118f. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.
- BARROS, M. A. B.; NETO, A. P. N.; VERGOLINO, J. R.; **Fatores competitivos da cadeia produtiva do gesso: o caso do pólo do Araripe em Pernambuco**. XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, Outubro de 2006.

- BIANCO, Lorenza et al. **Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results.** *energy and buildings*, v. 95, p. 86-91, 2015.
- BOER, D. E. **Hot wire technique for determining high thermal conductivities.** *REFRACT. J. Refract. J.*, n. 5, p. 22, 1980.
- CALLISTER, WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- CALLISTER, William D. et al. **Materials science and engineering: an introduction.** 8. ed. New York: Wiley, 2007.
- CANUT, M. M. C.; **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfagesso como material de construção.** 2006. 154f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CARSLAW, H. S. JAEGER, J. C. **Conduction of heat in solids.** Oxford University Press, Oxford, 1959.
- CHURCHILL, Stuart W.; CHU, Humbert HS. **Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate.** *International journal of heat and mass transfer*, v. 18, n. 11, p. 1323-1329, 1975.
- CORREIA, CONCEIÇÃO DE MARIA PINHEIRO; SOUZA, MILTON FERREIRA DE. **Mechanical strength and thermal conductivity of low-porosity gypsum plates.** *Materials Research*, v. 12, n. 1, p. 95-99, 2009.
- COQUARD, P.; BOISTELLE, R. **Water and solvent effects on the strength of set plaster.** *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts.* Pergamon, 1994. p. 517-524.
- DANA, J. D. **Dana's manual of mineralogy.** Tradução de Rui Ribeiro Franco; reviso por Cornelius S. Hurlbut Jr. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1970.
- DIAS, A. M. N.; CINCOTO, M. A. **Revestimento à base de gesso de construção.** *Boletim técnico da Escola Politécnica da USP.* São Paulo, 1995.

- DOUGLAS, JR, JIM. **On the numerical integration of  $\partial^2 u \partial x^2 + \partial^2 u \partial y^2 = \partial u \partial t$  by implicit methods.** Journal of the society for industrial and applied mathematics, v. 3, n. 1, p. 42-65, 1955.
- DOUGLAS, JIM; RACHFORD, HENRY H. **On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables.** transactions of the american mathematical society, p. 421-439, 1956.
- GUNN, J. E. et al. **A general formulation of alternating direction methods. part I. parabolic and hyperbolic problems.** Numerische mathematik, v. 6, p. 428-453, 1964.
- PEACEMAN, DONALD W.; RACHFORD, JR, HENRY H. **The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations.** Journal of the society for industrial and applied mathematics, v. 3, n. 1, p. 28-41, 1955.
- FERNANDES, F. R. F.; da Luz, A. B.; CASTILHOS, Z. C.; **Agro minerais para o Brasil.** Centro de Tecnologia Mineral – CTM, Rio de Janeiro, 2010.
- FREITAS, V. P. **Isolamento térmico de fachadas pelo exterior. Relatório – HT 191A/02.** Maxit Group. Porto, Portugal. 64 p, 2002. Disponível em <[http://www.maxit.pt/media/12/tecdocs/revestimentos/HT\\_191A\\_02.pdf1.pdf](http://www.maxit.pt/media/12/tecdocs/revestimentos/HT_191A_02.pdf1.pdf)> acesso em: 01 de dez. 2014
- FROTA, ANÉSIA BARROS.; SCHIFFER, SUELI CAMPOS. ; **Manual de Conforto Térmico.** 5.ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GARCIA-GUINEA, J. et al. **Phosphor plasters of caso4: Dy on the courtyard wall of Djehuty's tomb (Luxor, Egypt).** Radiation Measurements, v. 43, n. 2, p. 849-853, 2008.
- GERALD, C. F.; WHEATLEY, P. O. **Applied Numerical Analysis.** Upper Saddle River, NJ, Pearson Education, 1998.

- HAUPIN, W. E. **Hot wire method for rapid determination of thermal conductivity**. American Ceramic Society Bulletin, v. 39, n. 3, p. 139-141, 1960.
- HARMATHY TZ. **The SFPE handbook of fire protection engineering**. section. Society of Fire Protection Engineers/National Fire Protection Association: Boston, 1988.
- HIRSCH, C. **Numerical computation of internal and external flows** Vol. 1. 2. ed. Editora BH, Burlington, MA-USA,2007.
- **HOFFMAN, J. D. Numerical methods for engineers and scientists**. New York, McGraw-Hill, 1992
- HOLMAN, JACK PHILIP. **Transferência de calor**. Tradução Luiz Fernando Milanez 5. ed. São Paulo, McGraw – Hill do Brasil, 1983.
- HOLMAN, JACK PHILIP. **Heat transfer**. 10. ed. New York, McGraw – Hill, 2010.
- INCROPERA, FRANK. P. ET AL. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Tradução Carlos Alberto Biolchini da Silva. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- INCROPERA, FRANK P. ET AL. **Principles of heat and mass transfer**. 7. Ed. Jefferson City: John Wiley & Sons John Wiley & Sons, 2013.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8894: methods of sampling and physical tests for refractory materials (part 21 determination of thermal conductivity according to hot-wire method (cross-array)**. 1990. 12p.
- LIMA, JOÃO PINTO. **Modelagem e teste de condutividade térmica em placa de gesso e fibra vegetal, Mauritia vinifera martius, para uso na construção civil**. 2005.117 f. Dissertação (Mestrado profissional em engenharia mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- LYRA SOBRINHO, A.C.P., AMARAL, A.J.R., DANTAS J.O.C., **Gipsita, Relatório do departamento nacional de produção mineral DNPM 2008.** Disponível em: <[HTTP://WWW.DNPM.GOV.BR/ASSETS/GALERIADOCUMENTO/SUMARIOMINERAL2008/GIPSITA.PDF](http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriadocumento/sumarioMineral2008/gipsita.pdf)> acesso em: 21 Out. 2014.
- MANSOUR, Mohammed Ben et al. **Thermal characterization of a Tunisian gypsum plaster as construction material.** Energy Procedia, v. 42, p. 680-688, 2013.
- METREVELLE, S. M. L. S. ,CAROLLO, L. F S., G, D. A. **Caracterização térmica de polímeros usando o método do fio quente.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA, 5.,2010, Campina Grande-PB.
- MITTENBUHLER, A. **An Apparatus for the Measurement of the Thermal Conductivity of Refractory Bricks, Granular Materials and Powders.** German; english abstract, ber. deut. keram. ges, v. 41, n. 1, p. 15, 1964.
- MORROW, G. D. **Improved hot wire thermal conductivity technique.** American Ceramic Society Bulletin ., v. 58, n. 7, p. 687, 1979.
- **OLIVEIRA, F. M. C.; BORGES, L.E.P.;MELO, E.B;BARROS, M.L.S.C.** Características mineralógicas e cristalográficas da gipsita do Araripe. HOLOS. v5, p.71-82, 2012.
- ÖZISIK, M. N. **Heat conduction.** 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- ÖZISIK, M. N. **Heat transfer – A basic approach.** New York, McGraw-Hill, inc., 1990.
- PERES, L., BENACHOUR, M., SANTOS, V. A., **Gesso: produção e utilização na construção civil.** Serviço brasileiro de apoio às micro e pequenas empresas – SEBRAE, Recife, 2008.
- PHILLIPS, R. W. **Materiais dentários de Skinner.** 9.ed. Rio de Janeiro: Guanabara- Koogan, 1993. p.103-23.

- PRATES, R. M. **Metodologia para caracterização não invasiva do tempo de enrijecimento do gesso**. 2015. 75f. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.
- QUEIROZ, A.A.F., AMARAL, A.J.R., DANTAS J.O.C.,. **Gipsita, Relatório do departamento nacional de produção mineral DNPM, 2014. Disponível em** :<[HTTP://WWW.DNPM.GOV.BR/DNPM/SUMARIOS/GIPSITA-SUMARIO-MINERAL-2014/DOWNLOAD/FILE/GIPSITA\\_2013.PDF](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/gipsita-sumario-mineral-2014/download/file/gipsita_2013.pdf)> Acesso em : 16 jun. 2015.
- REYNAUD, PASCAL ET AL. **Water effect on internal friction of set plaster**. Materials science and engineering: A, v. 442, n. 1, p. 500-503, 2006.
- RIBEIRO, Abrahao Severo. **Produção de gesso reciclado a partir de resíduos oriundos da construção civil**. 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em engenharia urbana e ambiental). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB.
- RUGGIERO, Márcia a. Gomes; Lopes, Vera Lúcia da Rocha. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. Makron Books do Brasil, 1997.
- SANTOS, W. N.; CINTRA FILHO, J. S. **O método de fio quente**. Cerâmica, v. 37, n. 252, p. 101-103, 1991.
- SANTOS, Wilson Nunes dos. **Contribuição ao estudo da condutividade térmica do material cerâmico concreto refratário utilizando a técnica do fio quente com ajuste por regressão não linear**. 1988.147 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear)–Instituto de Pesquisas energéticas e Nucleares, São Paulo.
- SANTOS, W. N. dos. **O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície**. Cerâmica. 2002, vol.48, n.306, pp. 86-91.
- SANTOS ,W. N. MUMMERY, PAUL. WALLWORK, ANDREW. **Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos,v.14. n. 5 2004

- SANTOS, W. N. dos. **Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente.** Cerâmica. 2005, vol.51, n.320, pp. 372-381.
- SCHIEIRMACHER, A. L. **Wiedemann.** Ann. Phys, v. 34, p. 38-44, 1888.
- SILVA, DIEGO VINÍCIUS DE OLIVEIRA. **Caracterização mecânica de novos produtos produzidos a partir do gesso para isolamento térmico e acústico.** 2012. 53f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia mecânica), Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.
- SILVA, M. G. S.; **Desenvolvimento de compósitos à base de gesso e pó de fibras de coco.** 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.
- SILVA, D. V. O.; DANTAS, A. C. S. **Produção de novos produtos para isolamento térmico e acústico a partir do gesso.** In: VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luiz. Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012.
- SINGH, N. B.; MIDDENDORF, B. **Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization.** Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, v. 53, n. 1, p. 57-77, 2007.
- SOARES, JOELMA DA PENHA. **Estudo microestrutural do gesso-alfa produzido pelo processo hidrotérmico e calcinação a seco e sua influência nas propriedades mecânicas pós-hidratação.** 2005. 61f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- THOMSON, N. H.; **Análise Teórico-Experimental para a Identificação de Propriedades Termofísicas com a Técnica da Sonda-Linear.** 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- YOVANOVICH, M. M.et al., **Handbook of Heat Transfer.** New York, McGraw-Hill, 1998.

- VAN DER HELD, E. F. M.; VAN DRUNEN, F. G. **A method of measuring the thermal conductivity of liquids**. Physica, v. 15, n. 10, 1949.