



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE LENTE DE FRESNEL PARA  
DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DO CARBONATO DE CÁLCIO**

**Bruna Sene Alves Araújo**

**Uberlândia – MG**

**2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE LENTE DE FRESNEL PARA  
DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DO CARBONATO DE CÁLCIO**

Bruna Sene Alves Araújo

Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Uberlândia – MG**  
**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A663a      Araújo, Bruna Sene Alves, 1992-  
2018      Análise da viabilidade do uso de Lente de Fresnel para  
decomposição térmica do carbonato de cálcio [recurso eletrônico] /  
Bruna Sene Alves Araújo. - 2018.

Orientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3031>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-,  
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química. III. Título.

---

CDU: 66.0

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
Telefone: (34)3239-4249 - [www.ppgeq.feq.ufu.br](http://www.ppgeq.feq.ufu.br) - [secpgeq@feq.ufu.br](mailto:secpgeq@feq.ufu.br)

**ATA**

Ata da defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

DEFESA DE: Dissertação de Mestrado, 23/2018, PPGEQ

DATA: 23 de julho de 2018 - 08:30

DISCENTE: 11622EQU003 - Bruna Sene Alves Araújo

TÍTULO DO TRABALHO: Análise da viabilidade do uso de lentes de Fresnel para decomposição térmica de carbonatos

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Químicos

LINHA DE PESQUISA: Processos de Separação

PROJETO DE PESQUISA DE VINCULAÇÃO: Estudo de concentradores solares

Às 08 horas e 30 minutos do dia 23 de julho do ano de 2018, na sala 1K228 - *Campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Kássia Graciele dos Santos - ICTE/UFTM; Ricardo Amâncio Malagoni - FEQUI/UFU; Cícero Naves de Ávila Neto - PPGEQ/UFU e Luiz Gustavo Martins Vieira - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais.

Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata Aprovada e não estabeleceu novo título para o trabalho.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, legislação e regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos às 10 horas e 59 minutos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Gustavo Martins Vieira, Presidente de Comissão**, em 23/07/2018, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Cícero Naves de Ávila Neto, Membro de Comissão**, em 23/07/2018, às 11:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do



[Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Kássia Graciele dos Santos, Usuário Externo**, em 23/07/2018, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Amâncio Malagoni, Membro de Comissão**, em 23/07/2018, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0593511** e o código CRC **2EDD8692**.

*Àqueles que não hesitaram em estar ao  
meu lado em todas as escolhas: Papi e Mama.*

---

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por me abençoar com muito mais do eu que eu preciso, por me permitir viver uma vida tão maravilhosa e, muito além disso, por me permitir ter sonhos e por me dar força, coragem e sabedoria para segui-los.

Aos meus amados pais, Adonilson e Neuzimar, pelo amor e apoio incondicionais, pelo exemplo e por me ensinarem que estar longe é diferente de não estar presente, mas principalmente, por me incentivarem a correr atrás dos meus sonhos e a lutar com persistência por eles.

Às minhas irmãs, Analyce e Michelly, e à minha amiga-irmã Ana. Para vocês eu não tenho palavras suficientes. Vocês são os melhores presentes que eu poderia ter nessa vida. Obrigada por estarem sempre ao meu lado, por me fazerem acreditar que essa vida vale muito e por não me permitirem desistir em nenhum momento.

Ao meu orientador, Prof. Luiz Gustavo, pela oportunidade de trabalhar em um projeto tão desafiador. Obrigada pelo apoio, pela confiança, por todo o tempo dedicado e, principalmente, pela orientação neste trabalho.

Ao Prof. Carlos Henrique Ataíde por disponibilizar equipamentos de seu grupo de pesquisa para algumas das análises realizadas nesta dissertação.

Aos meus amigos e familiares que acompanham de perto meus passos, por acreditarem em mim, torcerem e comemorarem cada etapa vencida. Mesmo à distância vocês sempre estiveram ao meu lado e fizeram cada dia longe menos difícil.

A todos os amigos que eu fiz ao longo desses dois anos de mestrado, em especial Fernanda e Thais, por sempre estarem presentes, pelo apoio incondicional, pela paciência e por estarem comigo em todos os momentos bons e ruins.

À minha amiga e doutoranda Érica que não mediu esforços para me auxiliar em todos os momentos. Obrigada pelo apoio, pela paciência, pelas discussões e principalmente por me acompanhar de sol a sol.

Agradeço aos membros da banca por dedicarem seu tempo no intuito de enriquecer este trabalho.

Gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional ao longo desses anos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.

*“Above all, don’t lose hope”.*

*Yann Martel*



---

# SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	xi
SIMBOLOGIA .....	xii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
CAPÍTULO 1 .....	16
INTRODUÇÃO .....	16
CAPÍTULO 2 .....	19
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1    Produção de Óxido de Cálcio (CaO).....	19
2.1.1 Histórico: A produção de cal virgem.....	19
2.1.2 A Cal Virgem e sua importância econômica .....	22
2.1.3 Custos de produção e controle de qualidade da cal .....	25
2.2 Calcinação do Carbonato de Cálcio (CaCO <sub>3</sub> ).....	25
2.2.1 Fatores que influenciam a calcinação .....	26
2.2.2 Aspectos termodinâmicos e cinéticos .....	27
2.3 Energia Solar .....	29
2.3.1 Tipos de Conversão da Energia Solar .....	31
2.3.2 Importância e Aplicações .....	32
2.4 Concentradores Solares .....	33
2.4.1 Tipos de Concentradores Solares.....	34
CAPÍTULO 3 .....	41
MATERIAL E MÉTODOS.....	41

3.1 Modelo para Dinâmica de Aquecimento de Corpos de Prova no Concentrador Solar de Lente de Fresnel.....	41
3.2.1 Previsão Teórica da Dinâmica de Aquecimento e Corpos de Prova ..	45
3.2 Localização .....	47
3.3 Caracterização do Carbonato de Cálcio para os testes de decomposição .....	49
3.3.1 Densidade .....	49
3.3.2 Análise Granulométrica .....	50
3.4 Metodologia Experimental .....	53
3.4.1 Escolha do Reator de Calcinação .....	54
3.4.2 Dinâmica de Aquecimento .....	55
3.4.3 Decomposição do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) .....	56
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>58</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
4.1 Previsão Teórica da Dinâmica de Aquecimento .....	58
4.2 Caracterização do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).....	65
4.2.1 Densidade .....	65
4.2.2 Granulometria .....	66
4.3 Ensaaios Experimentais .....	70
4.3.1 Dinâmica de Aquecimento .....	70
4.3.2 Escolha do Reator de Calcinação e Testes Exploratórios .....	74
4.3.3 Decomposição do carbonato de Cálcio.....	77
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>89</b>

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do processo de extração e das etapas de classificação granulométrica do calcário para a produção de cal.....	20
Figura 2.2 – Representação esquemática do processo de calcinação do calcário para a produção de cal.....	21
Figura 2.3 – Forno industrial rotativo (horizontal).....	22
Figura 2.4 – Esquema de um forno industrial vertical.....	22
Figura 2.5 – Distribuição do consumo de Cal por setores no Brasil.....	23
Figura 2.6 – Produção mundial de Cal virgem e hidratada por país e continentes.....	24
Figura 2.7 – Calcinação do $\text{CaCO}_3$ em $\text{CaO}$ em função da temperatura.....	27
Figura 2.8 – Projeção da demanda energética no mundo.....	30
Figura 2.9 – Irradiação do Brasil em uma média anual e em médias mensais.....	30
Figura 2.10 – Exemplos de Conversão Direta (a) e Indireta de Energia Solar (b e c)...	31
Figura 2.11 – Concentrador de foco linear do tipo Calha Parabólica.....	35
Figura 2.12 – Concentrador Solar do Tipo Disco.....	36
Figura 2.13 – Esquema de um Concentrador Solar do tipo Torre.....	37
Figura 2.14 – Concentrador Solar Plano.....	37
Figura 2.15 – Concentrador solar do tipo parabólico composto.....	38
Figura 2.16 – Concentrador do tipo Lente de Fresnel em comparação à lente convencional.....	38
Figura 2.17 – Sistemas de lentes de Fresnel.....	39
Figura 2.18 – Exemplos de lentes de Fresnel.....	39
Figura 3.1 – Esquema de um corpo de prova submetido à radiação solar concentrada por uma Lente de Fresnel.....	42
Figura 3.2 – Taxas de Energias Térmicas relacionadas ao corpo de prova cilíndrico..	42
Figura 3.3 – Unidade Experimental utilizando Lente de Fresnel de Área $0,09 \text{ m}^2$ .....	47

Figura 3.4 – Esquema da unidade experimental de área 1 m <sup>2</sup> .....	48
Figura 3.5 – Unidade Experimental utilizando de Lente de Fresnel de 1 m <sup>2</sup> .....	48
Figura 3.6 – Planta baixa da localização da área solicitada para instalação das unidades.....	49
Figura 3.7 – Possíveis reatores para a calcinação de Carbonato de Cálcio: a) porcelana; b) ferro fundido; c) carbetto de silício.....	54
Figura 4.1 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o alumínio...	59
Figura 4.2 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o cobre.....	59
Figura 4.3 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o Carbonato.....	59
Figura 4.4 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de alumínio.....	61
Figura 4.5 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de cobre.....	61
Figura 4.6 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de carbonato de cálcio.....	62
Figura 4.7 – Simulações da dinâmica de aquecimento de uma lente de Fresnel de 0,09 m <sup>2</sup> de área para o absorvedor de alumínio.....	63
Figura 4.8 – Simulações da dinâmica de aquecimento de uma lente de Fresnel de 0,09 m <sup>2</sup> de área para o absorvedor de cobre.....	64
Figura 4.9 – Distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio representada pelo Modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB).....	66
Figura 4.10 – Curva experimental da perda de massa em função da temperatura para a taxa de aquecimento de 15°C.min <sup>-1</sup> .....	67
Figura 4.11 – Curva experimental da derivada da perda de massa em função da temperatura para a taxa de aquecimento de 15°C.min <sup>-1</sup> .....	68
Figura 4.12 – Comparação entre os dados experimentais e calculados usando o Modelo de Reação Global: Curva TG.....	69
Figura 4.13 – Comparação entre os dados experimentais e calculados usando o Modelo de Reação Global: Curva DTG.....	70

Figura 4.14 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o absorvedor menor de Alumínio com radiação de $860 \text{ W.m}^{-2}$ e área de refração de $0,09 \text{ m}^2$ .....	71
Figura 4.15 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o absorvedor maior de Alumínio com radiação de $906 \text{ W.m}^{-2}$ e área de refração de $0,09 \text{ m}^2$ .....	71
Figura 4.16 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o menor absorvedor de cobre com radiação de $900 \text{ W.m}^{-2}$ e área de refração de $0,09 \text{ m}^2$ .....	73
Figura 4.17 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o maior absorvedor de cobre com radiação de $900 \text{ W.m}^{-2}$ e área de refração de $0,09 \text{ m}^2$ .....	73
Figura 4.18 – Reator de calcinação escolhido: carbeto de silício.....	75
Figura 4.19 – Comparação dos testes 1, 2, 5 e 6 fixando a massa em 1g e variando o tempo de exposição solar.....	77
Figura 4.20 – Superfície de resposta para a conversão do carbonato de cálcio em função da carga mássica e da área da lente de Fresnel.....	80

---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Matriz de Planejamento.....	46
Tabela 3.2 – Propriedades dos corpos de prova utilizados como absorvedores.....	47
Tabela 3.3 – Material e dimensões testados para o reator de calcinação.....	55
Tabela 3.4 – Testes exploratórios realizados na lente de 1 m <sup>2</sup> .....	56
Tabela 3.5 – Experimentos realizados para a decomposição do CaCO <sub>3</sub> .....	57
Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para correlação da Temperatura de Equilíbrio em função do Agrupamento Dimensional para os corpos de prova Alumínio, o Cobre e o Carbonato de Cálcio.....	62
Tabela 4.2 – Temperaturas de Equilíbrio e taxas de aquecimento obtidos por simulação para os corpos os corpos de prova com radiação média de 800 W.m <sup>-2</sup> e área de 0,09 m <sup>2</sup> .....	64
Tabela 4.3 – Parâmetros cinéticos obtidos segundo o modelo de reação global.....	69
Tabela 4.4 – Ensaio experimentais preliminares.....	76
Tabela 4.5 – Ensaio experimentais para decomposição térmica do carbonato para um tempo de exposição solar de 30 min.....	78
Tabela 4.6 – Efeito das variáveis Área [X1] e Carga Mássica [X2] sobre a conversão da decomposição do carbonato de cálcio (R <sup>2</sup> =0,9912).....	79
Tabela 4.7 – Efeito da variável Massa [X2] sobre a conversão da decomposição do carbonato de cálcio (R <sup>2</sup> =0,9269).....	79
Tabela A.1 – Dados obtidos de temperatura de equilíbrio e tempo de aquecimento para o alumínio, o cobre e o carbonato de cálcio a partir da implementação da Matriz de Planejamento.....	89

---

## SIMBOLOGIA

$A$	Área da lente de Fresnel ( $\text{m}^2$ )
$\tau$	Transmissividade (-)
$G$	Fluxo de radiação solar ( $\text{W.m}^{-2}$ )
$a$	Área da seção reta do corpo de prova ( $\text{m}^2$ )
$H$	Altura do corpo de prova (m)
$\rho$	Massa específica do corpo de prova ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
$\rho_s$	Refletividade do corpo de prova (-)
$\varepsilon_s$	Emissividade do corpo de prova (-)
$c_{ps}$	Calor específico do corpo de prova (-) ( $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$T_\infty$	Temperatura ambiente (K)
$q_{ri}$	Taxa de radiação refratada pela superfície do concentrador (W)
$q_r$	Taxa de energia incidente que é refletida pelo corpo de prova (W)
$q_e$	Taxa de energia emitida pelo corpo de prova (W)
$q_{conv}$	Taxa de radiação perdida por convecção no corpo de prova (W)
$F_\infty$	Fator de forma do corpo em relação ao meio ambiente (-)
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzmann ( $\text{W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$ )
$\alpha_s$	Absortividade do corpo de prova (-)
$M$	Carga mássica (kg)
$X$	Fração mássica cumulativa menor ou igual a $d_p$ (-)
$d_p$	Diâmetro volumétrico da partícula ( $\mu\text{m}$ )
$D_{63,2}$	Parâmetro do modelo RRB para distribuição granulométrica ( $\mu\text{m}$ )
$n$	Parâmetro do modelo RRB para distribuição granulométrica (-)
$k(T)$	Taxa de decomposição térmica
$x$	Conversão química (-)

$m_0$	Massa inicial (mg)
$m_t$	Massa medida no instante t (mg)
$m_f$	Massa final da análise (mg)
$k_0$	Fator pré-exponencial ( $s^{-1}$ )
$E_a$	Energia de ativação aparente ( $kJ.mol^{-1}$ )
$n$	Ordem da reação química (-)
$t$	Tempo (s)
$T$	Temperatura (K)
$R$	Constate Universal dos Gases ( $J.mol^{-1}K^{-1}$ )
$\omega$	Fator pré-exponencial reparametrizado (-)
$\gamma$	Energia de ativação reparametrizada (-)



---

## RESUMO

A energia solar é uma fonte energética que não produz resíduos e sua captação vem sendo amplamente estudada, principalmente, para processos que necessitam de altas temperaturas. O consumo de cal virgem ( $\text{CaO}$ ) tem aumentado nas últimas décadas e, apesar das suas inúmeras aplicações, seu processo industrial gera grandes impactos ambientais, como: a produção de  $\text{CO}_2$  e o alto gasto energético, advindo da queima de combustíveis fósseis ou eletricidade. Neste cenário, este trabalho tem como objetivo principal o estudo da viabilidade da produção de cal ( $\text{CaO}$ ) a partir da decomposição de Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), utilizando como fonte térmica a energia solar concentrada por Lentes de Fresnel. Dessa forma, foram construídos dois aparatos experimentais com Lentes de Fresnel de áreas ( $A$ ) distintas:  $A = 0,09 \text{ m}^2$  e  $A = 1 \text{ m}^2$ . A dinâmica de aquecimento de corpos de prova por Lentes de Fresnel foi prevista numericamente envolvendo as equações fundamentais dos Fenômenos de Transporte e o agrupamento dimensional ( $GA.M^{-1}$ ): radiação solar ( $G$ ), área da lente ( $A$ ) e carga mássica ( $M$ ), que variou entre 2500 e 671500  $\text{W.kg}^{-1}$ . Posteriormente, a dinâmica de aquecimento foi verificada experimentalmente, utilizando  $A = 0,09\text{m}^2$  e corpos de prova de alumínio e cobre, não alcançando temperaturas satisfatórias para os testes de decomposição do  $\text{CaCO}_3$ . Assim, utilizou-se o aparato de Lente de Fresnel de  $1\text{m}^2$  e experimentos de 30 min de exposição solar para avaliar a decomposição do  $\text{CaCO}_3$ . Além disso, foi investigado o melhor material para o reator de calcinação, analisando: cadinho de porcelana, ferro fundido e carbetto de silício. Foram proporcionadas pela Lente de Fresnel rampas de aquecimento entre 14 e  $24^\circ\text{C.min}^{-1}$ , sendo a maior temperatura de equilíbrio atingida de  $244^\circ\text{C}$  para lente de  $A = 0,09\text{m}^2$ . Foram atingidas temperaturas entre  $600^\circ\text{C}$  e  $800^\circ\text{C}$  para lente de  $A = 1\text{m}^2$ , que eram necessárias para que a reação química ocorresse. Foi possível registrar as perdas de massa e calcular a conversão por meio da estequiometria da reação de decomposição térmica, alcançando conversões de até 81,82% para o agrupamento dimensional ( $GA.M^{-1}$ ) de 4443,96  $\text{W.kg}^{-1}$ . Assim, conclui-se que para as massas estudadas (Reator +  $M_{\text{CaCO}_3}$ ) a concentração solar por lentes de Fresnel mostrou-se suficiente para realizar a decomposição térmica.

**Palavras-chave:** *energia solar, Lente de Fresnel, produção de Cal, decomposição, cinética.*

---

## ABSTRACT

Solar energy is an energy source that does not produce waste and its capture has been studied extensively, mainly for processes that need high temperatures. The consumption of lime (CaO) has increased in recent decades and, despite its numerous applications, its industrial process generates large environmental impacts, such as: CO<sub>2</sub> production and high energy expenditure, resulting from the burning of fossil fuels or electricity. In this scenario, this work has as main objective the study of the viability of the lime production (CaO) from the decomposition of Calcium Carbonate (CaCO<sub>3</sub>), using as a thermal source the solar energy concentrated by Fresnel Lenses. Thus, two experimental apparatus were constructed with Fresnel Lenses of different areas ( $A$ ):  $A = 0.09 \text{ m}^2$  and  $A = 1 \text{ m}^2$ . The heating dynamics of Fresnel Lens was predicted numerically involving the fundamental equations of Transport Phenomena and dimensional grouping ( $GA.M^{-1}$ ): solar radiation ( $G$ ), lens area ( $A$ ) and mass ( $M$ ), which ranged from 2500 to 671500 W.kg<sup>-1</sup>. Subsequently, the heating dynamics was verified experimentally, using  $A = 0,09\text{m}^2$  and aluminum and copper test bodies, not reaching satisfactory temperatures for the CaCO<sub>3</sub> decomposition tests. Thus, the Fresnel Lens apparatus of 1 m<sup>2</sup> and experiments of 30 min of solar exposition were used to evaluate the decomposition of CaCO<sub>3</sub>. In addition, the best material for the calcination reactor was investigated, analyzing: porcelain, cast iron and silicon carbide. Fresnel Lens were provided with heating ramps between 14 and 24 ° C.min<sup>-1</sup>, with the highest equilibrium temperature being 244 °C for lens of  $A = 0.09 \text{ m}^2$ . Temperatures between 600 °C and 800 °C were reached with lens of  $A = 1 \text{ m}^2$ , which were necessary for the chemical reaction to occur. It was possible to record mass losses and calculate the conversion by stoichiometry of the thermal decomposition reaction, achieving conversions of up to 81.82% for the 4443.96 W.kg<sup>-1</sup> dimensional grouping ( $GA.M^{-1}$ ). Thus, it is concluded that for the studied masses (Reactor +  $MCaCO_3$ ) the solar concentration by Fresnel lenses was sufficient to perform the thermal decomposition.

**Keywords:** *solar energy, Fresnel lens, Lime production, decomposition, kinetics*

---

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

A produção industrial de Cal ( $\text{CaO}$ ) dá-se a partir da decomposição térmica do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Olhando para um cenário mundial, o Brasil enquadra-se como o 5º maior produtor de Cal, o que totaliza cerca de 8,42 milhões de toneladas por ano, segundo dados da ABPC – Associação Brasileira dos Produtores de Cal (2014).

Nas últimas décadas, o consumo de cal virgem e hidratada vem crescendo significativamente, principalmente devido a muitos segmentos industriais que a envolvem em seus processos. Dentre as inúmeras aplicações para este produto, pode-se citar: construção civil (produção de cimento), indústria siderúrgica, processos de branqueamento de papel, tratamento de águas, produção de açúcar, entre outros (CETESB, 2017).

Apesar das diversas aplicações, a produção industrial de cal apresenta grandes impactos ambientais, dentre os quais se destacam: grande liberação de resíduos gerados na prospecção e beneficiamento do calcário; alta emissão de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) proveniente tanto da decomposição do carbonato de cálcio devido à queima de combustíveis fósseis para aquecimento dos fornos; alto gasto energético, devido à natureza endotérmica da reação; entre outros (JOHN *et al.*, 2014).

Diante disso, o uso da energia solar para produção de cal pode ser uma alternativa ambiental e tecnicamente viável, principalmente, quando se leva em conta o imenso crescimento industrial e demográfico, que acarreta em um aumento drástico da demanda energética. Este fato vem aumentando a busca por fontes de energia renováveis, limpas e que gerem pouco impacto ambiental quando consideradas em relação a fontes tradicionais não renováveis, como o petróleo, o carvão e o gás natural.

A energia solar é uma fonte primária de energia limpa, abundante e renovável que pode ter grande influência na redução de problemas relacionados às mudanças climáticas, a fim de atender às necessidades de diferentes setores da sociedade. Além

disso, ela apresenta um sistema flexível de captação, podendo ser coletada tanto em ambientes áridos e semiáridos quanto em ambientes urbanos (LARA *et al.*, 2013; PRADO, 2015).

O Brasil apresenta as condições climáticas favoráveis para o aproveitamento desse potencial térmico, haja vista que é o 5º maior país em extensão territorial com boas taxas de insolação durante o ano todo.

As aplicações da energia solar são diversas, desde o uso para a iluminação natural ou aquecimento de ambientes, até no processo fotossintético dos vegetais, na evaporação da água e na circulação da atmosfera, garantindo o ciclo hidrológico (ANEEL, 2000).

Entretanto, para o seu aproveitamento em aplicações térmicas brandas (110°C a 400°C) ou mais severas (acima de 400°C), é necessário o uso de técnicas de concentração solar que irão captar e direcionar a luz solar para uma região espacial desejada.

Uma das técnicas existentes é a concentração solar por lentes de Fresnel, que são dispositivos ópticos que podem ser empregados na concentração da radiação solar. Um aparato de lentes de Fresnel é composto por uma ou mais lentes que criam um ponto ou uma área de concentração dos raios solares, que serão absorvidos na região focal e repassados para qual for a função destinada do aparato (PRADO *et al.*, 2014).

Neste cenário, o objetivo geral dessa dissertação foi estudar a viabilidade da decomposição térmica do Carbonato de Cálcio para a produção de Óxido de Cálcio (CaO), utilizando como fonte térmica a energia solar concentrada por Lentes de Fresnel.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar o carbonato de cálcio empregado quanto à granulometria (Difração a *Laser - mastersizer*), à densidade (Picnometria a gás Hélio) e à decomposição térmica (TGA/dTG);
- Projetar um sistema de decomposição – a partir de fundamentos de Fenômenos de Transporte e Termodinâmica – de modo a prever a relação entre as principais variáveis operacionais da unidade experimental:
  - carga mássica;

- área de captação solar;
  - intensidade da radiação solar.
- Construir duas unidades de bancada que acoplem Lentes de Fresnel, a fim de caracterizar preliminarmente as dinâmicas de aquecimento de corpos de provas na primeira e, posteriormente, analisar a capacidade do sistema em decompor o carbonato de cálcio em cal na segunda unidade.

Assim sendo, o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para que a decomposição térmica do Carbonato de Cálcio seja compreendida, bem como a produção de Cal, subdivido em alguns temas: produção industrial de cal, calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , energia solar e por fim, são descritos os concentradores, seus tipos, aplicações e, em especial, os concentradores solares do tipo lente de Fresnel.

No Capítulo 3 são apresentados os métodos abordados neste trabalho, a fim de descrever: a localização das unidades experimentais, o modelo para a dinâmica de aquecimento, a caracterização da matéria-prima empregada, bem como os procedimentos experimentais adotados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados numéricos e experimentais com as respectivas discussões pertinentes. No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões, bem como sugestões para trabalhos futuros.

---

## CAPÍTULO 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

---

Este capítulo irá abordar os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da decomposição térmica do  $\text{CaCO}_3$ , dos concentradores solares e como a energia solar pode ser útil nesses processos. Também serão citados trabalhos correlatos ao assunto encontrados na literatura. O capítulo está dividido em quatro temas: energia solar, concentradores solares (tipos e aplicações), a calcinação do  $\text{CaCO}_3$  e a produção de  $\text{CaO}$ .

Em um primeiro momento, será apresentada a produção de óxido de cálcio, abrangendo o fluxograma do processo industrial, bem como sua importância econômica, aplicações, os tipos de fornos utilizados e os custos para sua produção e controle de qualidade. Também serão abordados os fatores que influenciam a calcinação do  $\text{CaCO}_3$ , bem como seus aspectos termodinâmicos e cinéticos.

Na segunda parte será relatado como a energia solar pode ser útil nesses processos, abordando um pouco sobre a radiação solar, os tipos de conversão de energia solar, sua importância e aplicações.

Nesta linha, a terceira seção abordará os concentradores solares, seus tipos, vantagens e aplicações, dando ênfase aos concentradores solares do tipo Lente de Fresnel. Por fim, serão citadas pesquisas e estudos correlatos ao assunto nos últimos anos.

### 2.1 Produção de Óxido de Cálcio ( $\text{CaO}$ )

#### 2.1.1 Histórico: A produção de cal virgem

A produção de cal virgem é decorrente da decomposição do calcário em um processo térmico denominado de calcinação, o qual ocorre quando a sua temperatura de decomposição é atingida (ALVES *et al.*, 2016). Segundo Guimarães (1998), a cal apresenta origem mineral e compostos químicos cristalograficamente organizados;

sua formação dá-se desde a época pré-cambriana, entre 4 e 4,5 milhões de anos atrás até os dias atuais.

As rochas calcárias, também conhecidas como rochas carbonatadas, são rochas sedimentares com constituição rica em carbonatos, que ocupam um volume expressivo na crosta terrestre, apesar de sua ocorrência com alta pureza estar limitada a cerca de 10% das reservas exploradas (FREAS *et al.*, 2006).

Para Sampaio e Almeida (2005), essas rochas são formadas expressivamente pelos minerais calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) e aragonita ( $\text{CaCO}_3$ ), com destaque para as calcitas que são o principal constituinte mineralógico dos calcários de elevada pureza, apresentando, portanto, maior valor econômico. Assim, o calcário calcítico é a rocha carbonatada mais comum, seguido do calcário dolomítico e do mármore.

A aragonita, apesar de possuir a mesma composição química da calcita, distingue-se na estrutura cristalina. Seu aproveitamento econômico acontece apenas para os depósitos de conchas calcárias e oolitas (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

A produção industrial da cal virgem envolve inúmeras etapas, desde a extração da matéria-prima até o consumidor final. O fluxograma do processo de extração e das etapas de classificação do calcário é apresentado na Figura 2.1.

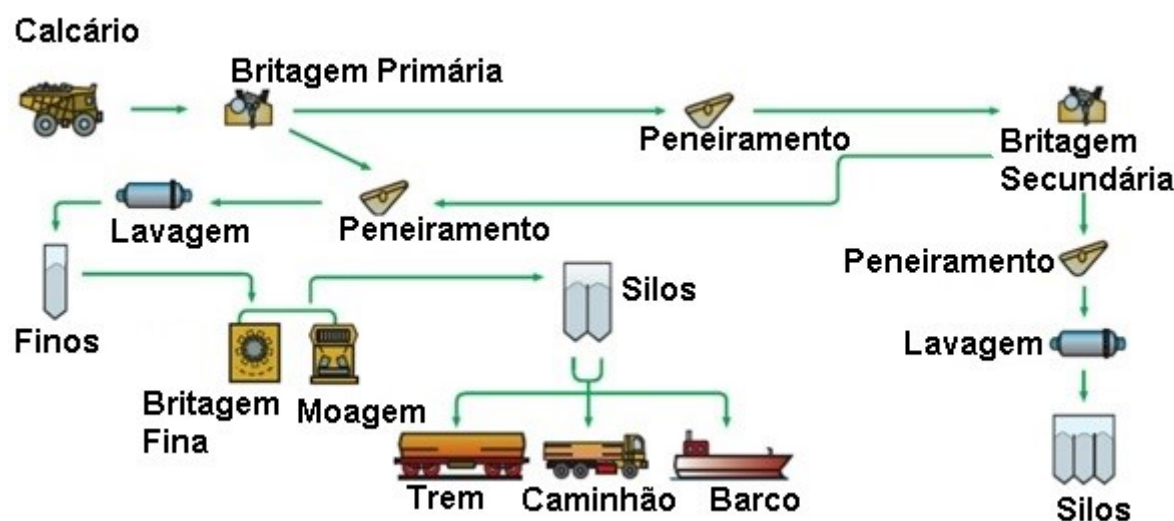


Figura 2.1 – Fluxograma do processo de extração e das etapas de classificação granulométrica do calcário para a produção de cal. Fonte: Adaptado de Barbosa (2014).

O calcário, após a sua extração, passa por um processo de fragmentação em britadores, com o objetivo de aumentar a superfície de contato, reduzindo o tamanho

das partículas. A seguir, é realizada uma moagem em moinhos (de martelos, de bolas, centrífugos, pendulares, entre outros), a fim de obter granulometrias mais uniformes (TOMÁS, 2007).

Na sequência, o calcário passa pelo peneiramento, onde é realizada a seleção granulométrica, seguindo para as etapas de classificação por tamanho. Em alguns casos, tem-se a etapa de lavagem, com a finalidade de remover impurezas (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

Finalmente, após esse tratamento prévio o calcário é submetido à calcinação, processo no qual será decomposto em óxido de cálcio (cal virgem) e gás carbônico. Uma representação esquemática do processo de decomposição térmica do calcário em cal virgem é mostrada na Figura 2.2.

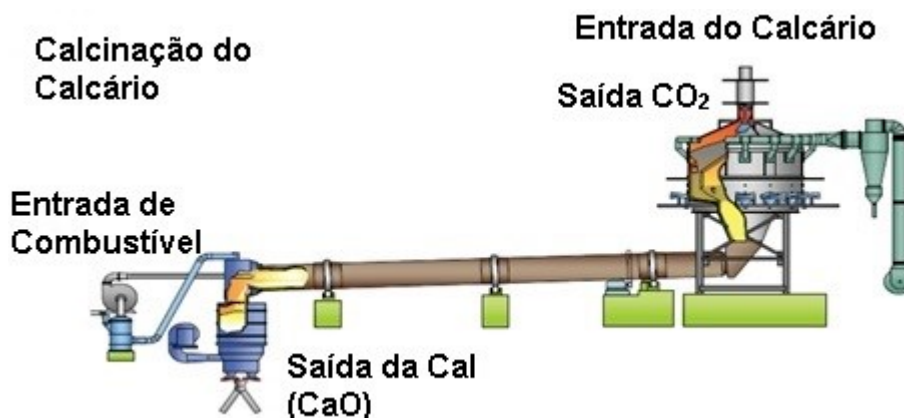


Figura 2.2 – Representação esquemática do processo de calcinação do calcário para a produção de cal. Fonte: Adaptado de Barbosa (2014).

Na etapa de calcinação são utilizados fornos industriais, que se classificam em: verticais, usados para produzir cal em pedras, e horizontais, responsáveis pela produção de cal pulverizada, os quais são apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4. Portanto, a escolha do forno irá depender da granulometria, da matéria-prima utilizada e da quantidade produzida. Além disso, o desempenho dos fornos será influenciado pelo tipo de combustível utilizado, sendo que os mais comuns são: coque de petróleo, gás natural, lenha, óleo combustível e o carvão mineral ou vegetal (LIMA, 2016).

Independentemente do tipo de forno utilizado, eles são geralmente revestidos com tijolos refratários e tem seus cascos confeccionados em aço (BARBOSA, 2014). Esta etapa é a que requer maior custo de investimento na produção de cal.



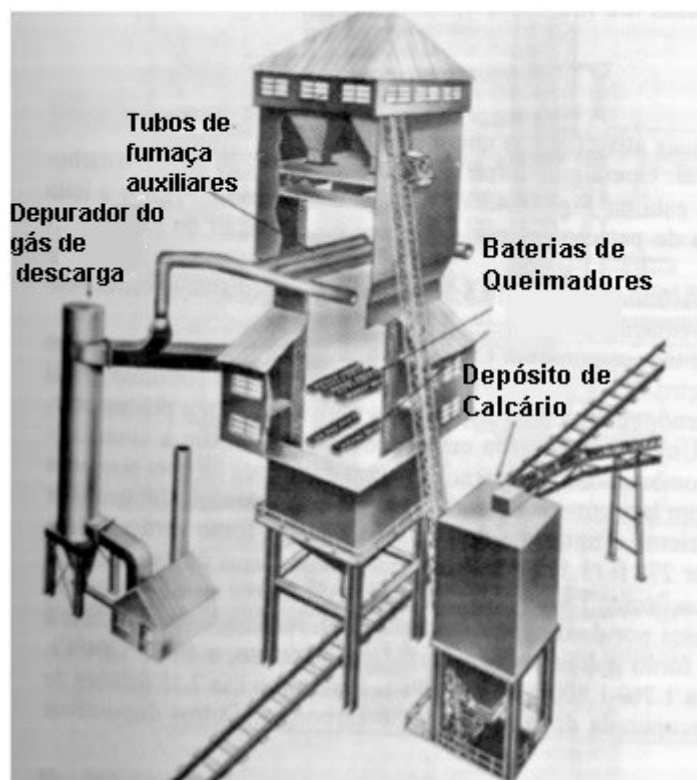


Figura 2.3 – Esquema de um forno industrial vertical. Fonte: Adaptado de Tomás (2007).



Figura 2.4 – Forno industrial rotativo (horizontal). Fonte: Tomás (2007).

### 2.1.2 A Cal Virgem e sua importância econômica

A cal virgem, também conhecida como cal viva, é um produto altamente versátil que apresenta inúmeras aplicações e destaca-se pelo seu consumo misto, visto que pode ser utilizado tanto como insumo quanto como produto. Apresenta massa molar de 56,07 g.mol<sup>-1</sup>, sendo de origem mineral.

No mercado global, a Cal virgem cálcica ganha destaque, devido a sua aplicação nas áreas siderúrgicas, de açúcar e de celulose. Na Figura 2.5 é apresentada a produção mundial de cal virgem e hidratada por país e região (CORATHERS, 2016).

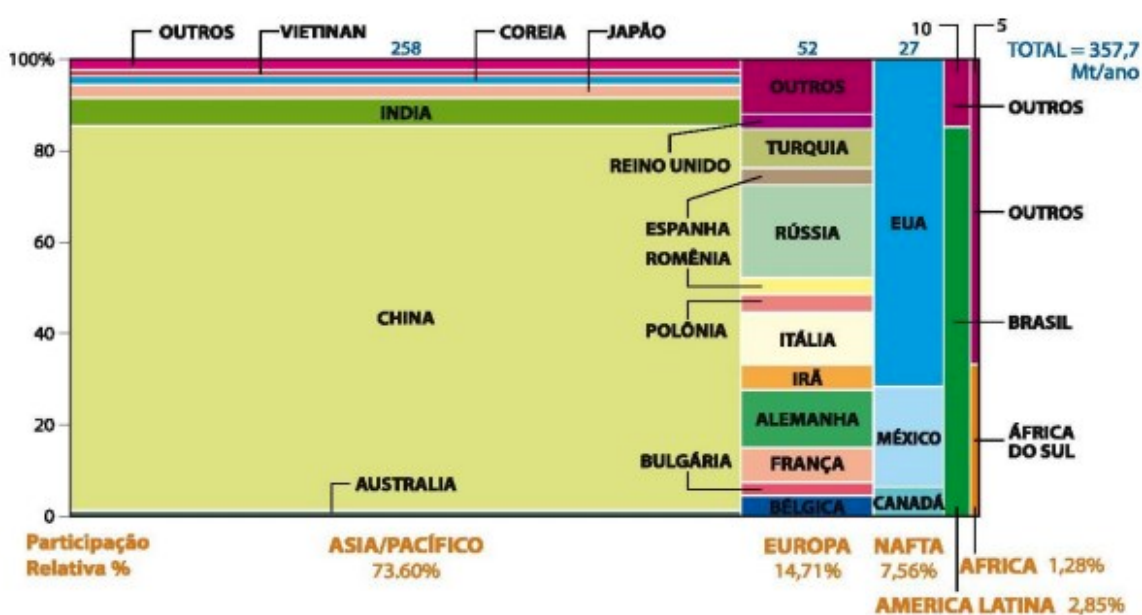


Figura 2.5 – Produção mundial de Cal virgem e hidratada por país e continentes.  
Fonte: Dados da ABPC (2014 apud CORATHERS, 2016).

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (2017), no ano de 2016 a produção mundial de Cal foi de 350 milhões de toneladas. Neste cenário, estimou-se a produção brasileira em 8,42 milhões de toneladas, representando 2,41%, ocupando a 5ª posição no cenário internacional. As regiões Sul e Sudeste do país são responsáveis por 85% da produção de cal virgem e hidratada. A distribuição do consumo de Cal no Brasil por setores, no ano de 2014, segundo dados da ABPC, é apresentada na Figura 2.6.

Das muitas aplicações que a cal apresenta, algumas se destacam: siderurgia, construção civil, indústrias químicas, papel e celulose, açúcar e álcool, tintas, cerâmica e metalurgia de não-ferrosos. Além disso, sua utilização também se dá em

tratamentos de águas industriais e potáveis, estabilização de solos (como aglomerante e cimentante), misturas asfálticas, corretivo de acidez de pastagens e solos agrícolas, dentre outras (PEREIRA, 2009).

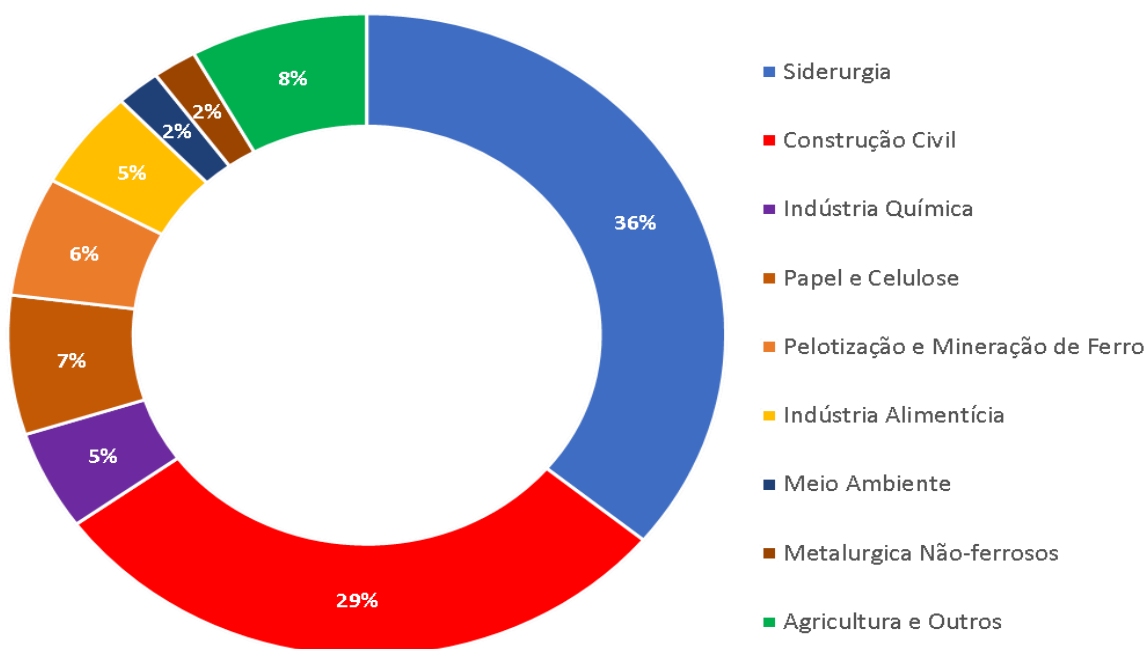


Figura 2.6 – Distribuição do consumo de Cal por setores no Brasil. Fonte: Dados da ABPC (2014).

Além da cal virgem, outro tipo muito comum é a cal hidratada ou hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), a qual é resultante da combinação química dos óxidos de anidros da cal virgem com água, gerando um sólido branco, de baixa solubilidade em água. A cal hidratada também é conhecida como cal extinta, cal química ou cal apagada (BARBOSA, 2014).

Segundo Silva (2007), a cal hidratada pode ser classificada de acordo com a quantidade de água utilizada no seu processo de hidratação, podendo estar seca ou conter água livre. No primeiro caso ela é conhecida como a cal hidratada propriamente dita, enquanto que no segundo caso, pode ser nomeada como pasta, lama ou leite de cal (ou água de cal), dependendo da quantidade de água presente.

Assim como a cal virgem, a cal hidratada também apresenta inúmeras aplicações, dentre as quais pode-se citar: o tratamento de efluentes industriais e de água potável, estabilização de solos, construção civil para argamassas, blocos, concretos, revestimentos e a clarificação de açúcares (BARBOSA, 2014).

### 2.1.3 Custos de produção e controle de qualidade da cal

A grande quantidade de calor necessária para que a reação química envolvida na produção de cal ocorra gera altos custos devido à energia requerida. Consequentemente, torna-se um desafio otimizar o processo, a fim de minimizar os custos de produção, bem como os impactos ambientais, o que geralmente envolve a introdução de equipamentos e instrumentos mais sofisticados, implicando no uso de controle automático de vários parâmetros de operação (GEORGE *et al.*, 2010).

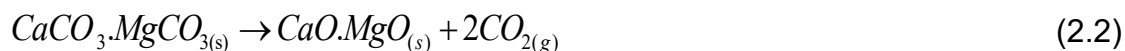
Dentre os fatores relacionados aos custos de produção, pode-se citar: combustível, controle de qualidade, energia elétrica, além de manutenção, mão-de-obra, impostos, entre outros. Estima-se que o gasto com combustíveis corresponda a cerca de 60% dos custos totais de produção. Além disso, cerca de 50% dos custos de produção relacionados ao consumo de combustíveis são concentrados na fase da calcinação (SOARES, 2007; GEORGE *et al.*, 2010).

George *et al.* (2010) realizaram estudos com o objetivo de controlar o consumo de combustíveis e matérias-primas na produção de cal. Os resultados foram convenientes, tendo os custos de produção reduzidos e a qualidade do produto melhorada. O estudo consistiu em aplicar um método de controle operacional no processo de calcinação, reduzindo o consumo de combustível, matéria-prima e consequente impacto ambiental do processo.

Como a qualidade da cal produzida afeta diretamente o produtor e o consumidor, é fundamental ter um controle de qualidade rígido. As características físico-químicas, como granulometria, umidade, reatividade, densidade, teores de cálcio e magnésio (no calcário) são fatores que têm influência direta na qualidade da cal obtida após a reação e devem ser acompanhadas. Essas análises são estabelecidas pela ABNT-NBR 6473/2003 (GUIMARÃES, 1998; LIMA, 2016).

## 2.2 Calcinação do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )

O Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) está presente na maioria dos setores da indústria moderna, sendo o responsável pela produção de cal virgem ( $\text{CaO}$ ). O processo de calcinação do  $\text{CaCO}_3$  ocorre de acordo com as reações endotérmicas representadas pelas Equações (2.1) e (2.2).



A reação representada na Equação (2.1) envolve um elevado consumo de energia, necessitando de  $1,18 \times 10^6$  kcal por tonelada de cal produzida, e ocorre com redução de volume, devido à liberação de  $CO_2$ . Estima-se uma redução na massa original do carbonato de 44% para calcários calcíticos (Equação 2.1) e de 48% para calcários magnesianos (Equação 2.2) (BARBOSA, 2014).

### 2.2.1 Fatores que influenciam a calcinação

A etapa de calcinação é influenciada pelo tipo de material carregado no forno, pelo desempenho do forno, pelos aspectos físico-químicos da reação e pelo tipo de combustível utilizado, bem como seu aproveitamento e distribuição pelo forno (SOARES, 2007).

Além disso, alguns fatores devem ser levados em consideração neste processo, tais como: o aquecimento deve ser realizado até a temperatura de dissociação dos carbonatos; a temperatura mínima necessária deve ser mantida por um período de tempo que dependerá da cinética reacional e o  $CO_2$  liberado deve ser removido imediatamente do ambiente de calcinação (SAMPAIO; ALMEIDA, 2005).

No que diz respeito ao material carregado no forno, deve-se atentar para as características das rochas carbonáticas para que a operação de calcinação seja adequada, levando a um melhor aproveitamento do forno e consumo adequado de combustíveis. Dentre as propriedades importantes de serem avaliadas, citam-se: composição química e mineralógica, granulometria, cristalinidade e impurezas. Vale ressaltar que a calcinação em si ocorre quando os fornos atingem a temperatura de decomposição, na qual a carga mássica permanece por um “tempo de residência”, a fim de ser decomposta em cal (SOARES, 2007).

Alguns autores realizaram estudos para avaliar o comportamento da calcinação em função da temperatura. Reis *et al.* (2010) avaliaram que o carbonato de cálcio começa a degradar em temperaturas superiores a  $600^\circ C$ , sendo possível alcançar

100% de conversão acima de 800°C. Seus resultados são apresentados na Figura 2.7.

Segundo Sampaio e Almeida (2005), a etapa de calcinação também irá depender do tipo de calcário utilizado no processo, visto que as temperaturas de decomposição, bem como as taxas de conversão do calcário em cal serão distintas para os carbonatos de cálcio e magnésio.



Figura 2.7 – Calcinação do CaCO<sub>3</sub> em CaO em função da temperatura. Fonte: Reis et al. (2010).

### 2.2.2 Aspectos termodinâmicos e cinéticos

A termodinâmica e a cinética química da reação de calcinação oferecem informações importantes relacionadas à reação e as condições de temperatura, pressão e taxas de aquecimento.

#### 2.2.2.1 Aspectos Termodinâmicos

A calcinação do Carbonato de Cálcio (CaCO<sub>3</sub>) é uma reação de caráter endotérmico e, portanto, é favorecida por altas temperaturas. Um fator que irá

influenciar fortemente essa reação é a pressão parcial do CO<sub>2</sub>, a qual deve ser menor do que a pressão parcial de decomposição do CaCO<sub>3</sub> dada pela termodinâmica de equilíbrio para que a reação prossiga. O modelo reacional está descrito na Equação (2.3) (SOARES, 2007).



Soares (2007) também relata que a reação será afetada pela presença de altas concentrações de CO<sub>2</sub>. Em seus estudos foram realizados ensaios qualitativos, a fim de avaliar o efeito da concentração do CO<sub>2</sub> liberado durante a decomposição térmica do calcário. Os experimentos mostraram que após o início da calcinação e consequente liberação de CO<sub>2</sub>, a sua pressão parcial atinge um valor tal que a energia livre de Gibbs torna a reação termodinamicamente inviável, tornando necessário a presença de um gás de arraste que remova a concentração de gás carbônico do ambiente de calcinação.

#### 2.2.2.2 Aspectos Cinéticos

A análise dos aspectos cinéticos da decomposição do carbonato de cálcio é complexa devido a fatores, tais como: a concentração de CO<sub>2</sub>, uma vez que em altas concentrações ele inibe a reação; o tamanho da partícula, visto que algumas granulometrias podem limitar a transferência de calor e massa e a inibição catalítica devido à presença de impurezas na matéria-prima (SOARES, 2007).

Um procedimento bastante utilizado para se obter os parâmetros cinéticos da decomposição térmica do carbonato de cálcio é a análise termogravimétrica (TGA), na qual as amostras têm sua variação de massa monitorada, em função da temperatura, obtendo curvas termogravimétricas (TG) (PALANDRI *et al.*, 1993; BARBOSA, 2014).

Palandri *et al.* (1993) realizaram estudos com TGA para obter a cinética da decomposição térmica do CaCO<sub>3</sub>. Foi possível determinar as constantes cinéticas das reações direta e inversa que ocorrem durante a calcinação. A energia de ativação da reação direta é estimada em 251,04 kJ.mol<sup>-1</sup>(60kcal.mol<sup>-1</sup>). Além disso, foi realizada uma validação das constantes, utilizando dados termodinâmicos e estudando a

configuração da partícula durante o processo de decomposição. Conclui-se que a TGA é uma técnica adequada para determinar os dados cinéticos, porém é uma abordagem que exige a modelagem da difusão do CO<sub>2</sub> dentro dos interstícios das partículas.

## 2.3 Energia Solar

A energia solar é uma fonte primária de energia limpa, abundante e renovável que tem grande influência na redução de problemas relacionados à mudança climática, a fim de atender às necessidades de diferentes setores da sociedade (LARA *et al.*, 2013; PRADO, 2015).

O Sol destaca-se como a principal fonte energética de vida na Terra e é responsável pelos processos termodinâmicos, bem como pelo dinamismo da atmosfera e pelos fatores climáticos e ambientais (DANTAS *et al.*, 2003; PRADO, 2015).

Define-se radiação solar como a energia radiante emitida pelo Sol, proveniente das reações que acontecem na superfície do astro e derivada da radiação eletromagnética. Da energia emitida pelo sol, uma fração insignificante é interceptada pela Terra. Cerca de 30% de toda a radiação incidente sobre a Terra é refletida para o espaço, enquanto 20% é absorvida por moléculas de ar e nuvens. Cerca de 0,01% já seria o bastante para atender às necessidades da população terrestre (CHEN, 2011).

Características da radiação solar como intensidade, distribuição espectral e angular, são afetadas antes de atingir a superfície terrestre devido à sua interação com a atmosfera. Portanto, para o seu aproveitamento, a radiação solar pode ser submetida a um processo de concentração de raios solares, a partir de espelhos parabólicos, lentes, entre outros (CRESESB, 2006).

A energia solar tornou-se tema recorrente em debates internacionais. Além disso, as projeções crescentes da demanda energética para o mundo, como pode ser visualizado na Figura 2.8, e as constantes buscas por fontes renováveis de energia evidenciam sua importância.

O Brasil, principalmente por contar com uma elevada taxa de incidência solar em grande parte da sua extensão territorial, apresenta as condições favoráveis para



o aproveitamento desse potencial térmico, o que faz com que o seu uso seja cada vez mais incentivado, uma vez que o país apresenta a 5ª maior área do mundo, podendo se tornar promissor neste mercado. Na Figura 2.9 é apresentado um mapa de irradiação do Brasil em uma média anual e em médias mensais.

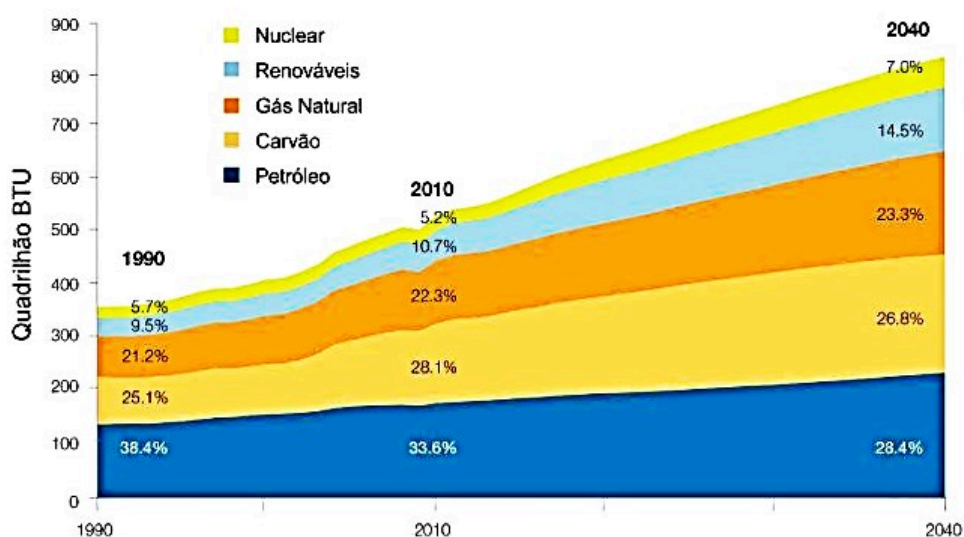


Figura 2.8 – Projeção da demanda energética no mundo. Fonte: Prado (2015).

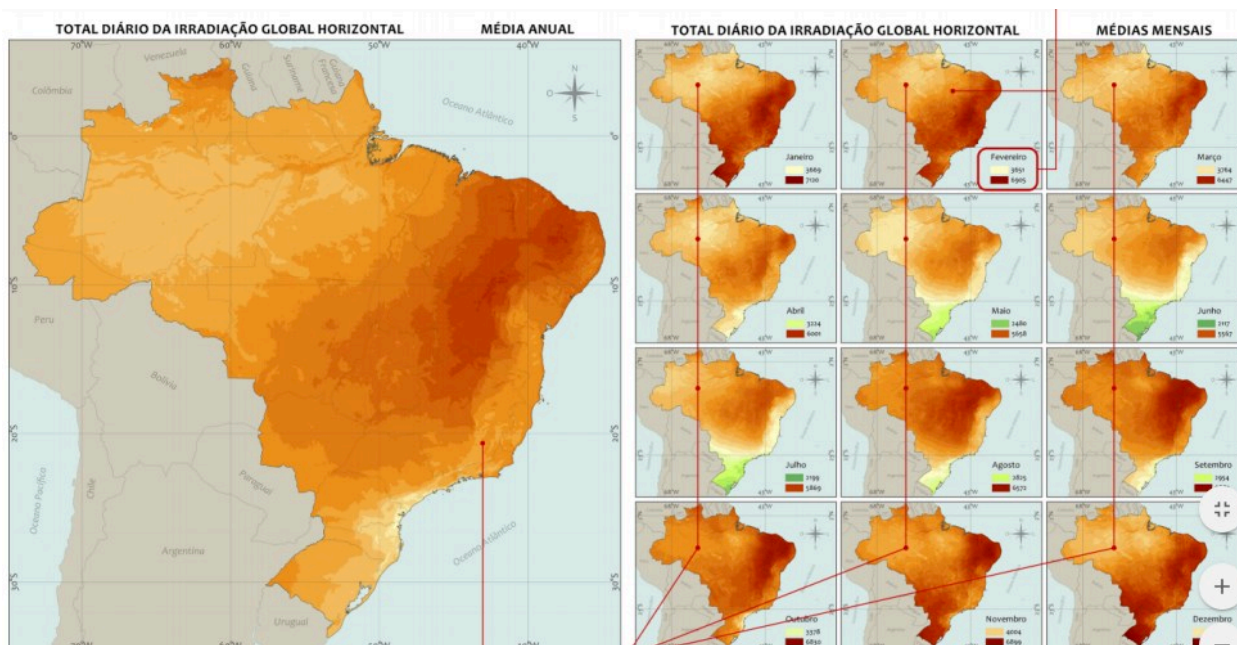


Figura 2.9 – Irradiação do Brasil em uma média anual (3500 a 6250 Whm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>) e em médias mensais (2000 a 7500 Whm<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>). Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

### 2.3.1 Tipos de Conversão da Energia Solar

A energia solar proporciona sistemas de captação flexível, visto que pode ser coletada tanto em ambientes áridos e semiáridos, como desertos e sertões, quanto em ambientes urbanos, através de telhados, vidros e fachadas (PRADO, 2015). Para sua utilização, tem-se duas tecnologias de conversão envolvidas: a conversão direta ou ativa e a conversão indireta ou passiva (PRADO *et al.*, 2014; KABIR *et al.*, 2018).

Na Figura 2.10 são apresentados exemplos de conversão direta, os painéis solares, e indireta, o concentrador e coletor solar.



Figura 2.10 – Exemplos de Conversão Direta (a) e Indireta de Energia Solar (b e c).  
Fonte: Boreal Solar (2016).

Por definição, a conversão indireta (ou passiva) envolve o acúmulo de energia solar transformando-a em energia térmica, enquanto que a conversão direta (ou ativa), coleta a radiação solar e usa equipamentos mecânicos e elétricos (por exemplo, bombas ou ventiladores) para a conversão da energia solar em energia elétrica (KABIR *et al.*, 2018).

A conversão direta pode ser realizada através de painéis solares, por exemplo, onde são utilizadas células fotovoltaicas para transformar energia solar em elétrica.

Nos últimos anos, a tecnologia fotovoltaica envolvendo o uso de semicondutores para converter luz solar diretamente em energia elétrica, tornou-se uma opção altamente desejada (KABIR *et al.*, 2018).

Por outro lado, a captação indireta de energia solar é feita a partir de equipamentos planos, tais como aquecedores solares de fins domésticos ou concentradores de raios solares, que captam os raios solares e os concentra em uma região focal linear ou pontual (PRADO *et al.*, 2014).

O uso da energia solar a partir de coletores solares ou concentradores solares é muito utilizado para o aquecimento de fluidos. Os coletores solares têm sua utilização mais restrita a aplicações industriais e comerciais para o aquecimento de água, tais como, hotéis, restaurantes, clubes, entre outros; enquanto que os concentradores solares se destacam em situações que requerem temperaturas mais elevadas, como a secagem de grãos e a pirólise (ANEEL, 2000).

### 2.3.2 Importância e Aplicações

Atualmente, a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis tornou-se uma necessidade urgente para um desenvolvimento sustentável e limpo no setor de energia mundial, visto que o uso de fontes poluidoras afeta diretamente o meio ambiente, impactando a atual e as próximas gerações. Neste cenário, a energia solar surge como um recurso energético altamente promissor para atender a demanda energética, uma vez que é limpa, barata e abundante. Dessa forma, muitos estudos e pesquisas são realizados em busca da diversidade da matriz energética, a fim de incluir fontes energéticas alternativas e renováveis (TSURUDA *et al.*, 2017; SANSANIWAL *et al.*, 2018).

Inúmeros países no mundo buscam autossuficiência em geração de energia atrelada a uma variedade da matriz energética, isto é, a ordem mundial é que exista uma diversidade de fontes de energia alternativas que supram a demanda de cada país. A energia solar é uma das melhores opções para atender a essa demanda futura de energia, visto que é superior em termos de disponibilidade, acessibilidade, capacidade e eficiência quando comparada a outras fontes de energia (TSURUDA *et al.*, 2017; KABIR *et al.*, 2018).

Segundo Prado *et al.* (2007), a energia solar surge como uma opção economicamente viável, auxiliando na redução do consumo de energia elétrica, além

de contribuir para o desenvolvimento sustentável. Além disso, é uma energia que não polui com seu uso, visto que a poluição gerada pelos seus equipamentos é completamente controlada; e, ainda, tem custos menores por contar com o uso de equipamentos simples que precisam de manutenções reduzidas (JACOB, 2016).

Tsuruda *et al.* (2017) avaliaram a aplicação da energia solar como um indutor do desenvolvimento sustentável e social em habitações, no interior do estado de Goiás, através de um sistema solar com microinversor. As ações geraram uma economia no consumo médio mensal de 145 kWh para 21,9 kWh, ou seja, uma redução de 85%, evitando, consequentemente, uma emissão de 73,53 kg de CO<sub>2</sub> por ano por habitação na atmosfera.

Segundo Sansaniwal *et al.* (2018), os sistemas de energia solar concentrada têm sido abrangentemente disseminados, visto que assim como os sistemas fotovoltaicos eles são considerados economicamente viáveis devido ao menor custo de instalação. Presume-se que até 2050, a energia solar fotovoltaica e os concentradores solares excedam a capacidade de geração de energia de 4000 TWh.ano<sup>-1</sup> com a ocupação de 10% da geração global de eletricidade cada um.

As aplicações da energia solar são diversas, desde o uso para a iluminação natural ou aquecimento de ambientes, até no processo fotossintético dos vegetais, na evaporação da água e na circulação da atmosfera, garantindo o ciclo hidrológico (ANEEL, 2000).

Entre as aplicações mais comuns está o aquecimento de fluidos, fornecimento de calor para processos industriais, geração de energia elétrica, processos de dessalinização, secagem de grãos, geração de vapor, entre outros. Para o emprego da energia solar em aplicações de médias (100°C a 400°C) a altas temperaturas (maiores que 400°C), é necessário utilizar meios de concentração solar que irão captar e converter a energia solar em um outro tipo de energia (geralmente térmico) (LARA *et al.*, 2013).

## 2.4 Concentradores Solares

A concentração solar é uma tecnologia necessária quando o assunto é explorar a alta eficiência da radiação solar usada como fonte de calor, uma vez que apesar da

irradiância do sol ser cerca de  $63 \text{ MW.m}^{-2}$ , apenas cerca de  $1 \text{ kW.m}^{-2}$  chega na superfície do planeta (XIE *et al.*, 2011; ANDRADE, 2015).

Além disso, a radiação solar é intermitente, ou seja, não se encontra disponível à noite ou em dias nublados; e é distribuída de modo irregular ao longo do ano e das regiões do globo. Portanto, torna-se fundamental o desenvolvimento de métodos de armazenamento e concentração desta energia (RIBAS, 2016).

Neste âmbito, define-se concentrador solar como superfícies construídas com o objetivo de captar a energia solar, direcionando seus raios de forma pontual ou linear, fazendo uso dos princípios da reflexão ou da refração. Tais estratégias são responsáveis pelo aumento da quantidade de energia incidida sobre um absorvedor, através da região focal, na qual a radiação solar é convertida em energia térmica (PRADO *et al.*, 2014).

A concentração solar tem se tornado a maneira mais comum de coletar a energia para obter altas temperaturas. A eficiência de coleta está basicamente conectada à precisão óptica da unidade utilizada, ou seja, quão bem localizado está o foco do coletor, às condições de isolamento do absorvedor e às condições climáticas do ambiente envolvido, tais como: velocidade do vento, nuvens, umidade, chuva e o fluxo de radiação solar, o qual pode ser medido a partir de piranômetros, heliógrafos ou piro-neliômetros (PRADO, 2015).

Além disso, o projeto do equipamento coletor e do corpo absorvedor é essencial para que a radiação solar seja convertida em calor com eficiência (ANDRADE, 2015). As principais vantagens dos concentradores solares são: a capacidade de atingir temperaturas mais altas, podendo ser útil em diversos processos; menores chances de perdas, devido à área de aquecimento utilizada ser reduzida e o menor custo envolvido com materiais de construção (GARG; PRAKASH, 2000).

#### 2.4.1 Tipos de Concentradores Solares

De acordo com o ponto focal, os concentradores solares podem ser classificados em concentradores de foco linear e concentradores de foco pontual, os quais são classificados em alguns subtipos. A escolha do tipo de concentrador irá depender basicamente das características de rastreadibilidade, do índice de

concentração, do formato do corpo absorvedor e da temperatura almejada (ANDRADE, 2015; PRADO, 2015).

Os tipos mais comuns de tecnologias de concentração solar atualmente disponíveis no mercado, são: calhas parabólicas (cilíndrico), bacias parabólicas (disco), torre solar, concentrador plano e solar composto e, por fim, os concentradores de lente de Fresnel (PRADO, 2015).

#### 2.4.1.1 Concentrador Solar de Calha Parabólica

O concentrador do tipo calha, também denominado como cilíndrico ou calha-parabólica, é atualmente uma das tecnologias mais experimentadas entre os sistemas de geração de energia térmica (BIANCHINI, 2013). Um esquema de uma calha parabólica, juntamente com um concentrador real é apresentado na Figura 2.11.

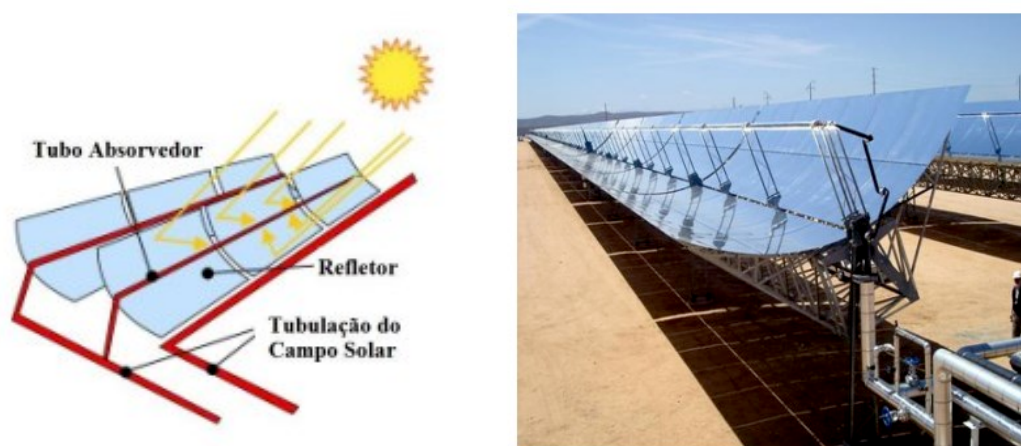


Figura 2.11 – Concentrador de foco linear do tipo Calha Parabólica. Fonte: *Renewable Power* (2009).

Este tipo de concentrador possui foco linear e é composto por fileiras paralelas de espelhos côncavos interligados entre si, além de um sistema de rastreamento de um eixo e um tubo absorvedor, no qual passa um fluido de alta capacidade térmica. Este fluido será aquecido pelos raios solares, bombeado através de trocadores de calor, gerando eletricidade (BIANCHINI, 2013).

Esses concentradores trabalham em faixas de temperatura entre 100°C e 400°C e podem ser úteis em processos de aquecimento de águas nas caldeiras e em estações elétricas, além de poder ser utilizado como força motriz em bombas de irrigação (PRADO, 2015).



#### 2.4.1.2 Concentrador Solar de Disco

Também conhecido como paraboloide de revolução, este tipo de concentrador solar possui ponto focal pontual e rastreamento de dois eixos. Seu funcionamento é baseado na concentração dos raios solares, nos discos parabólicos refletores, direcionando-os para o receptor que se encontra no foco do disco. A Figura 2.12 apresenta um exemplo de concentrador solar do tipo disco (BIANCHINI, 2013; PRADO, 2015).



Figura 2.12 – Concentrador Solar do Tipo Disco. Fonte: Global Nevadacorp, 2011.

Neste tipo de concentrador as faixas de temperatura variam entre 100°C e 1500°C, explicitando a alta eficiência que o mesmo possui para concentrar calor. Isso ocorre pelo fato deste tipo de concentrador solar conseguir rastrear o sol em dois eixos, sendo capaz de receber os raios solares o dia todo. Entretanto, seus custos de instalação tendem a ser mais elevados quando comparado aos outros sistemas (KALOGIROU, 2009).

#### 2.4.1.3 Concentrador Solar do Tipo Torre

Este concentrador solar possui ponto focal do tipo pontual e um sistema de rastreamento de dois eixos. Além disso, apresenta superfícies reflexivas côncavas ou

planas que circundam o absorvedor (fixo), de tal forma que os raios solares são direcionados e concentrados nele, conforme mostra a Figura 2.13 (PRADO, 2015).

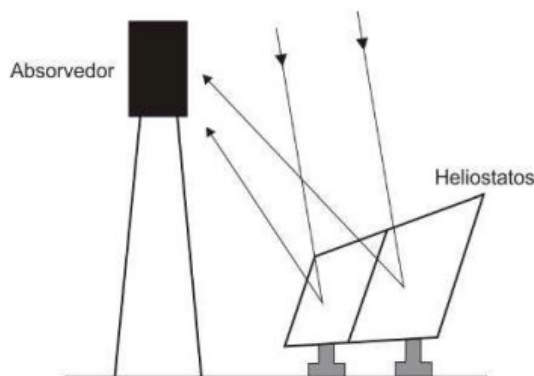


Figura 2.13 – Esquema de um Concentrador Solar do tipo Torre. Fonte: Prado (2015).

A faixa de temperatura deste tipo de concentrador está entre  $300^{\circ}\text{C}$  e  $1500^{\circ}\text{C}$ , além disso ele conta com um sistema de armazenamento de energia, garantindo estoques para os períodos noturnos ou para os dias nublados (BAUER *et al.*, 2013).

#### 2.4.1.4 Concentrador Plano

Este tipo trata-se de um modelo simples que apresenta um ou mais espelhos planos, que podem ser fixos ou variáveis, e guiam os raios solares para o absorvedor, tal como apresentado na Figura 2.14, atingindo temperaturas de até  $86^{\circ}\text{C}$  (PRADO, 2015).

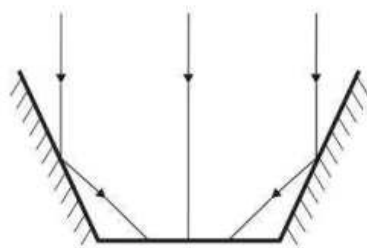


Figura 2.14 – Concentrador Solar Plano. Fonte: Prado (2015).

#### 2.4.1.5 Concentrador Solar Parabólico Composto

Segundo Prado (2015), o concentrador solar parabólico composto apresenta uma faixa de temperatura entre  $100^{\circ}\text{C}$  e  $250^{\circ}\text{C}$ . Tem como principal vantagem a



recepção de raios solares ampla, devido às diversas reflexões internas que possui. Na Figura 2.15 é apresentado um esquema deste tipo, onde o absorvedor se encontra na parte inferior do coletor.

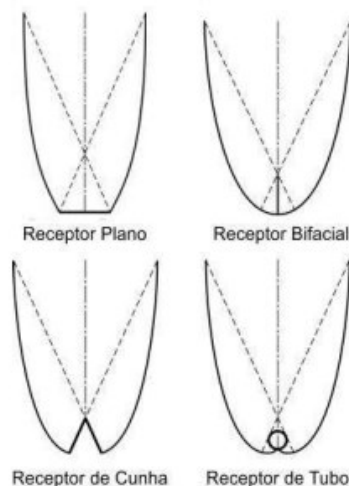


Figura 2.15 – Concentrador solar do tipo parabólico composto. Fonte: Prado (2015).

#### 2.4.1.6 Lentes de Fresnel

Lentes de Fresnel são dispositivos ópticos que podem ser empregados na concentração de radiação solar. O aparato de lentes de Fresnel é composto por uma ou mais lentes que criam um ponto ou uma área de concentração dos raios solares, que serão absorvidos na região focal e repassados para que se possa gerar energia elétrica, aquecer tubulações ou para qual seja a função destinada ao aparato, conforme percebe-se na Figura 2.16.

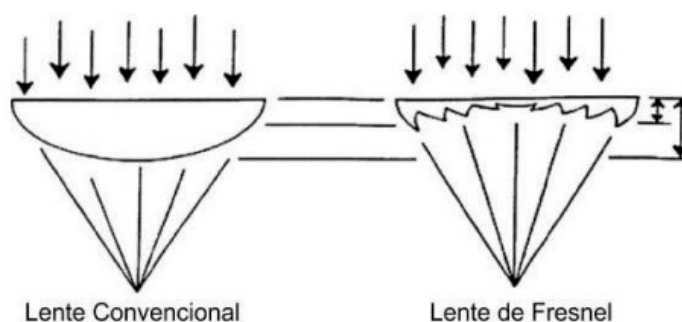


Figura 2.16 – Concentrador do tipo Lente de Fresnel em comparação à lente convencional. Fonte: Xie *et al.* (2011).

A concentração solar utilizando lentes de Fresnel faz uso dos princípios de refração, ao invés dos princípios da reflexão, é favorável e vem sendo estudada por

pesquisadores, devido à suas inúmeras vantagens, tais como, baixo custo, baixa exigência de rastreamento, além de ser leve, mais compacta que as lentes convencionais e ser fácil de ser configurada (MA *et al.*, 2017). Nas Figuras 2.17 e 2.18 são mostrados exemplos de sistemas com lentes de Fresnel.



Figura 2.17 – Sistemas de lentes de Fresnel. Fonte:GMM (2018).



Figura 2.18 – Exemplos de lentes de Fresnel. Fonte: GMM (2018).

Mijatovic *et al.* (1987) projetaram um sistema de concentração solar com lentes de Fresnel cilíndrico. Os resultados mostraram que a conversão fotoelétrica foi superior a 30%, podendo ser utilizada com sucesso para geração de energia.

Lara *et al.* (2013) fizeram uso de um modelo de concentrador de lentes de Fresnel para fornecer calor a um sistema de ar condicionado, comprovando que o modelo pode adquirir um alto nível de eficiência se otimizado adequadamente.

Lin *et al.* (2014) realizaram estudos para avaliar o desempenho de absorvedores de formatos diferentes com cavidade em lente de Fresnel com foco linear. Optou-se pelos seguintes tipos: o de arco, o triangular, o semicircular e o retangular. Concluíram que o modelo mais eficiente em termos ópticos foi o triangular e em termos de perda de calor foi o formato de arco.

Wu *et al.* (2017) estudaram um sistema de dessalinização solar multiestágio aquecido diretamente por um concentrador solar cilíndrico de lente de Fresnel. Foram obtidos resultados satisfatórios, entretanto, propuseram uma otimização do *design* e do processo para que os resultados fossem melhores.

---

## CAPÍTULO 3

# MATERIAL E MÉTODOS

---

Este capítulo será apresentado em três partes principais: os critérios adotados para o projeto e a construção do aparato experimental, bem como a localização deste. Também será caracterizada a matéria-prima utilizada, descrita a escolha do reator e a metodologia experimental adotada para a determinação do CaO a partir da calcinação do  $\text{CaCO}_3$ .

Na primeira seção serão abordados o projeto da unidade experimental, assim como todo o equacionamento matemático utilizado, além da previsão teórica da dinâmica de aquecimento da Lente de Fresnel. Em um segundo momento, será descrita a localização do concentrador solar utilizado, o qual foi utilizado na cidade de Uberlândia – MG.

A última sessão apresenta a caracterização do Carbonato de Cálcio, abordando granulometria, densidade e análises de termogravimetria (TGA) e os métodos utilizados para a devida escolha do reator. Além disso, neste ponto serão abordados a metodologia experimental da dinâmica de aquecimento, bem como os meios utilizados para a realização dos ensaios experimentais para a decomposição do  $\text{CaCO}_3$  em CaO, além da metodologia abordada para a medição da eficiência de conversão do sistema.

### 3.1 Modelo para Dinâmica de Aquecimento de Corpos de Prova no Concentrador Solar de Lente de Fresnel

Considerando uma Lente de Fresnel de área “ $A$ ” e transmissividade “ $\tau$ ” exposta a um fluxo de radiação solar “ $G$ ”. O ponto focal desta lente está incidindo sobre o topo de um corpo de prova cilíndrico de seção transversal “ $a$ ”, altura “ $H$ ”, densidade “ $\rho$ ”, refletividade “ $\rho_s$ ”, emissividade “ $\epsilon_s$ ” e calor específico “ $c_{ps}$ ”. Considera-se que a lateral e a base do corpo de prova estão totalmente isoladas e que entre a lente e o corpo há

ar “estagnado” à temperatura ambiente “ $T_\infty$ ”. Um esquema está representado na Figura 3.1.

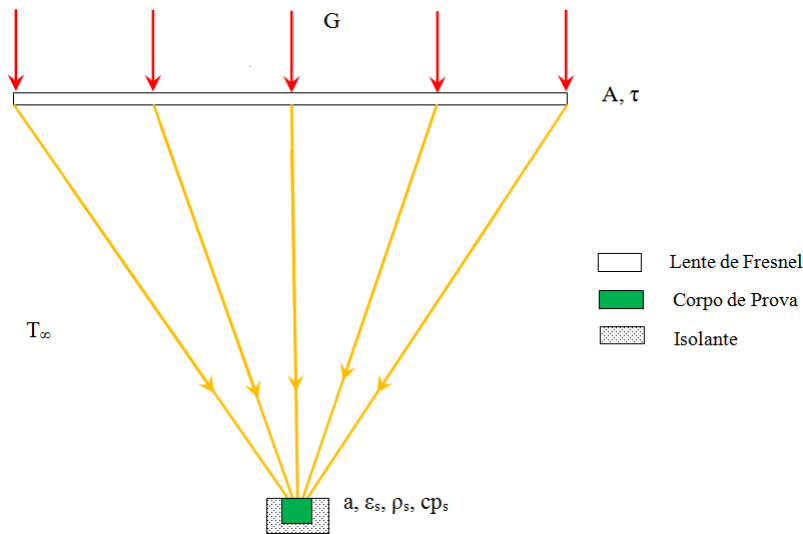


Figura 3.1 – Esquema de um corpo de prova submetido à radiação solar concentrada por uma Lente de Fresnel.

Foram realizadas simulações numéricas tendo como base o balanço de energia em um corpo de prova que se comporta como absorvedor, exposto, simultaneamente, à radiação solar e à convecção, com o intuito de prever as temperaturas de equilíbrio e a rampa de aquecimento, predizendo assim a dinâmica da lente de Fresnel.

Na Figura 3.2 é mostrado um esquema para o balanço de energia no corpo de prova cilíndrico, o qual é proposto na Equação (3.1), de onde tem-se que:  $q_{ri}$  é a taxa de radiação refratada pela superfície do concentrador (Lente de Fresnel) que atinge o corpo de prova,  $q_r$  é a taxa de radiação incidente que é refletida pelo corpo de prova,  $q_e$  é a taxa de energia radiante emitida pelo corpo de prova e  $q_{conv}$  é a taxa de energia perdida por convecção pelo corpo de prova.

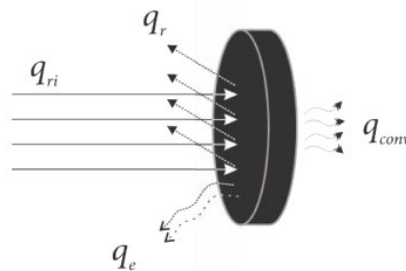


Figura 3.2 – Taxas de Energias Térmicas relacionadas ao corpo de prova cilíndrico. Fonte: Prado (2015).

$$aH\rho c_{ps} \frac{dT}{dt} = q_{ri} - q_r - q_e - q_{conv} \quad (3.1)$$

Substituindo os termos da direita, segundo as definições clássicas advindas dos Fenômenos de Transporte, pode-se propor o seguinte equacionamento:

$$aH\rho c_{ps} \frac{dT}{dt} = GA\tau - \rho_s GA\tau - F_\infty a \varepsilon_s \sigma (T^4 - T_\infty^4) - ha(T - T_\infty) \quad (3.2)$$

A partir da Equação (3.2), as seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas:

- Visto que o meio ambiente recebe a maior parte da radiação emitida ou refletida pelo corpo de prova, pode-se então, aproximar  $F_\infty = 1$  (fator de forma do corpo em relação ao meio ambiente);
- Condições da *Lei de Kirchhoff* válidas, portanto, a absortividade é numericamente igual à emissividade do corpo de prova  $\alpha_s = \varepsilon_s$ ;
- O corpo de prova é pintado de preto fosco, considerando-se emissividade  $\varepsilon_s = 0,97$ .
- Somatório das propriedades radiativas do corpo de prova: refletividade ( $\rho_s$ ) absortividade ( $\alpha_s$ ) e transmissividade ( $\tau_s$ ) é igual a 1;
- Corpo de prova opaco, portanto,  $\rho_s = 1 - \alpha_s$ ;
- O foco permanece centrado no corpo de prova;
- O corpo de prova tem formato cilíndrico;
- A resistência interna condutiva do material que constitui o corpo de prova é desprezível de modo que a temperatura seja uniforme em todo sistema.

Reorganizando a Equação (3.2) a partir das hipóteses simplificadoras, pode-se propor a Equação Diferencial que descreve o processo de aquecimento do corpo de prova pela Lente de Fresnel, cuja condição de contorno aplicável é  $T(0) = T_\infty$ , conforme demonstrado na Equação (3.3).

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{H\rho c_{ps}} \left[ (1 - \varepsilon_s) \tau G \frac{A}{a} - \varepsilon_s \sigma (T^4 - T_\infty^4) - h(T - T_\infty) \right] \quad (3.3)$$

Analisando a Equação (3.3) tem-se que no estado estacionário, o corpo de prova atinge o equilíbrio térmico, cuja temperatura de equilíbrio ( $T_E$ ) pode ser calculada pela Equação (3.4).

$$\varepsilon_s \sigma (T_E^4 - T_\infty^4) + h(T_E - T_\infty) - (1 - \varepsilon_s) \tau G \frac{A}{a} = 0 \quad (3.4)$$

Nas equações anteriores, o Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor foi calculado pela correlação aplicada a superfícies superiores de placas sendo resfriadas:

$$Nu = 0,27 Ra^{1/4} \quad (3.5)$$

em que:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g \beta_f (T - T_\infty) L^3}{\nu_f \alpha_f} \quad (3.6)$$

$$L = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \quad (3.7)$$

$$\beta_f = \frac{1}{T_F} \quad (3.8)$$

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (3.9)$$

$$\alpha_f = \frac{k_f}{\rho_f c p_f} \quad (3.10)$$

As propriedades físicas do ar ( $\mu_f$ ,  $\rho_f$ ,  $c p_f$ ,  $k_f$ ,  $\beta_f$ ) foram avaliadas na Temperatura de Filme ( $T_F$ ) e mediante curva de ajustes:

$$T_F = \frac{T + T_\infty}{2} \quad (3.11)$$

$$\mu_f = f(T_F); c p_f = f(T_F); \rho_f = f(T_F); k_f = f(T_F); \beta_f = f(T_F) \quad (3.12)$$

$$\bar{h} = \frac{Nu k}{L} \quad (3.13)$$

Dessa forma, tem-se que a Equação (3.3) representa o modelo da dinâmica de aquecimento da Lente de Fresnel, ou seja, a partir dele tem-se a descrição da variação de temperatura de um corpo de prova ao longo do tempo, sendo possível prever a rampa de aquecimento e a temperatura máxima que o corpo de prova pode atingir (Temperatura de Equilíbrio).

Da mesma forma, essa equação pode ser resolvida numericamente para diversas situações físicas de aquecimento, podendo variar as principais condições operacionais (radiação, temperatura ambiente, propriedades físicas e dimensões do corpo de prova, área e transmissividade da lente de Fresnel).

### 3.2.1 Previsão Teórica da Dinâmica de Aquecimento e Corpos de Prova

A previsão teórica da dinâmica de aquecimento, dada pelo Tempo de Aquecimento ( $t_E$ ) que determinado corpo de prova necessitou para atingir a Temperatura de Equilíbrio ( $T_E$ ) foi feita utilizando-se os mesmos fatores e faixas operacionais usados por Andrade *et al.* (2016) sob a forma de um Planejamento Fatorial Completo do tipo  $3^3$  (três fatores e três níveis).

Os fatores utilizados foram: área da Lente de Fresnel ( $A$ ), a massa do corpo de prova ( $M$ ) e o fluxo de radiação solar incidente ( $G$ ). Na Tabela 3.1 são apresentados os fatores e as faixas operacionais considerados, que abrangem:  $0,050 \leq A(m^2) \leq 0,790$ ;  $0,001 \leq M(kg) \leq 0,005$  e  $250 \leq G (W.m^{-2}) \leq 850$ .

Assim, para cada condição simulada  $N$  da Matriz de Planejamento, obteve-se uma Temperatura de Equilíbrio e um Tempo de Aquecimento necessário para atingir as condições de equilíbrio, sendo possível avaliar a rampa de aquecimento para cada corpo de prova utilizado.

A partir da implementação da Equação (3.4) nas condições operacionais da Tabela 3.1, foi possível propor uma equação de ajuste para a Dinâmica de Aquecimento dos corpos de prova (alumínio e cobre) e para o carbonato de cálcio, conforme Equação (3.14), que relaciona a Temperatura de Equilíbrio com os fatores avaliados. Os parâmetros  $k$  e  $m$  são constantes de ajuste dela. Ao conjunto de fatores ( $GA.M^{-1}$ ) foi dada a denominação de Agrupamento Dimensional.



Tabela 3.1 – Matriz de Planejamento. Fonte: Andrade *et al.* (2016).

<i>N</i>	<i>A</i> (m <sup>2</sup> )	<i>M</i> (kg)	<i>G</i> (W.m <sup>-2</sup> )
<b>01</b>	0,050	0,001	250
<b>02</b>	0,050	0,001	550
<b>03</b>	0,050	0,001	850
<b>04</b>	0,050	0,003	250
<b>05</b>	0,050	0,003	550
<b>06</b>	0,050	0,003	850
<b>07</b>	0,050	0,005	250
<b>08</b>	0,050	0,005	550
<b>09</b>	0,050	0,005	850
<b>10</b>	0,420	0,001	250
<b>11</b>	0,420	0,001	550
<b>12</b>	0,420	0,001	850
<b>13</b>	0,420	0,003	250
<b>14</b>	0,420	0,003	550
<b>15</b>	0,420	0,003	850
<b>16</b>	0,420	0,005	250
<b>17</b>	0,420	0,005	550
<b>18</b>	0,420	0,005	850
<b>19</b>	0,790	0,001	250
<b>20</b>	0,790	0,001	550
<b>21</b>	0,790	0,001	850
<b>22</b>	0,790	0,003	250
<b>23</b>	0,790	0,003	550
<b>24</b>	0,790	0,003	850
<b>25</b>	0,790	0,005	250
<b>26</b>	0,790	0,005	550
<b>27</b>	0,790	0,005	850

$$T_E = k \left( \frac{GA}{M} \right)^m \quad (3.14)$$

Na sequência da estimativa numérica da temperatura de equilíbrio e rampa de aquecimento, alguns corpos de prova foram testados experimentalmente. Nos experimentos de rampa de aquecimento, os corpos de prova utilizados como absorvedores foram cilindros de alumínio e cobre. Para cada material, utilizou-se duas peças de tamanhos e massas diferentes. Para os experimentos de dinâmica de aquecimento, os corpos de prova foram pintados de preto fosco, a fim de corresponder às hipóteses propostas para o balanço de energia anteriormente. Na Tabela 3.2 são apresentadas as propriedades dos absorvedores utilizados.

Tabela 3.2 – Propriedades dos corpos de prova utilizados como absorvedores.

	$H$ (cm)	$m$ (g)	$D$ (cm)	$\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$c_{ps}$ (J.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Alumínio	2,91	2,20	1,905	2700	900
	4,54	3,49	1,905		
Cobre	1,32	3,49	1,905	8920	385
	2,28	5,80	1,905		

### 3.2 Unidade Experimental

Neste trabalho foram construídas duas unidades experimentais. A primeira unidade experimental utilizada, representada na Figura 3.3, foi composta por um aparato que suporta uma lente de Fresnel quadrada de área 0,09 m<sup>2</sup>, uma superfície de vidro, a qual possuía um elevador tipo Jack, usado para ajustar o corpo de prova no foco da lente de Fresnel, situado perpendicularmente a 15 cm da mesma. Além disso, contou com um solarímetro portátil, responsável pela medição da radiação solar e um medidor de temperatura com termopares tipo K. Esta unidade foi utilizada para o estudo do aquecimento dos corpos de prova citados anteriormente.

Figura 3.3 – Unidade Experimental utilizando Lente de Fresnel de Área 0,09 m<sup>2</sup>.

A segunda unidade experimental foi composta por um aparato que suportava uma lente de Fresnel de 1 m<sup>2</sup> de área, como pode ser visualizado no projeto apresentado na Figura 3.4. Para a realização dos testes foram acoplados à unidade, conforme mostra a Figura 3.5, o solarímetro portátil e o medidor de temperatura com termopares tipo K, além de uma haste que mantinha o reator de calcinação no foco

da lente, o qual estava situado perpendicularmente a 1,5 m da mesma. Também foi utilizada uma lona plástica como anteparo para a proteção do vento.

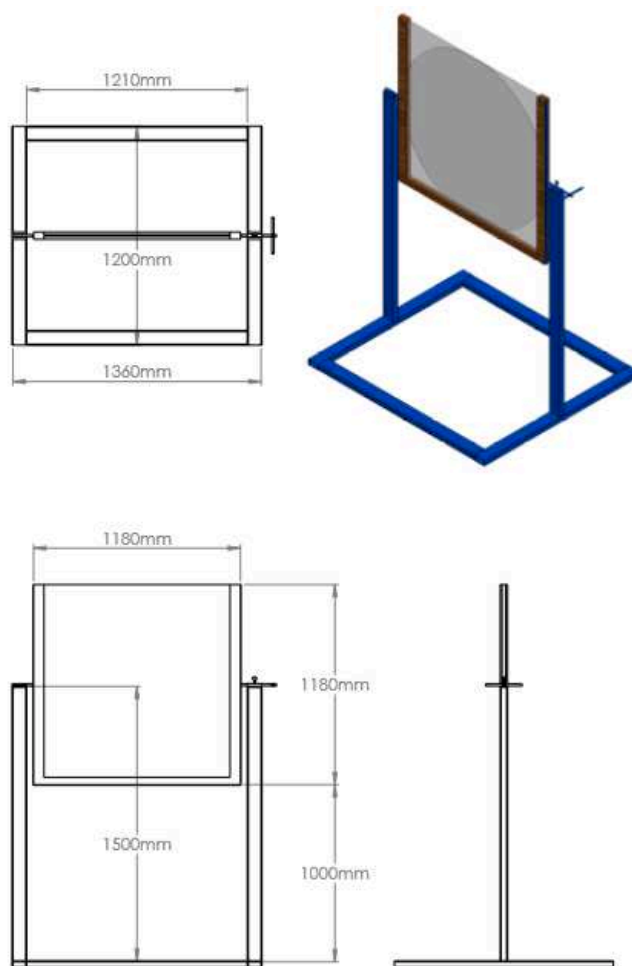


Figura 3.4 – Esquema da unidade experimental de área 1 m<sup>2</sup>.

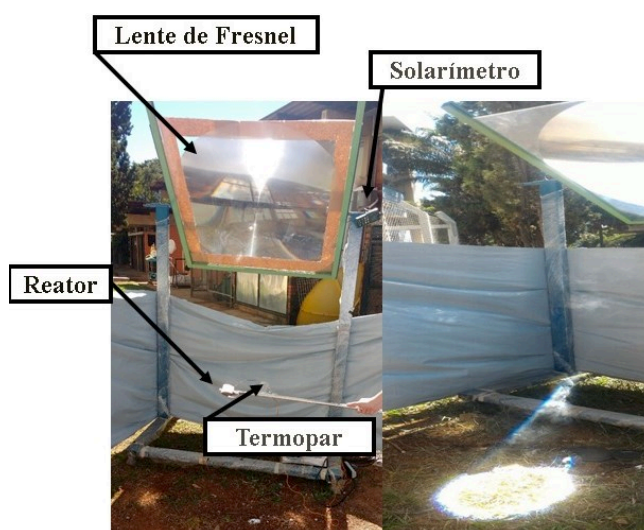


Figura 3.5 – Unidade Experimental utilizando de Lente de Fresnel de 1 m<sup>2</sup>.

As unidades experimentais foram utilizadas na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia – *Campus* Santa Mônica, Uberlândia – MG, próximo ao laboratório de energias renováveis, na área em destaque apresentada na Figura 3.6.

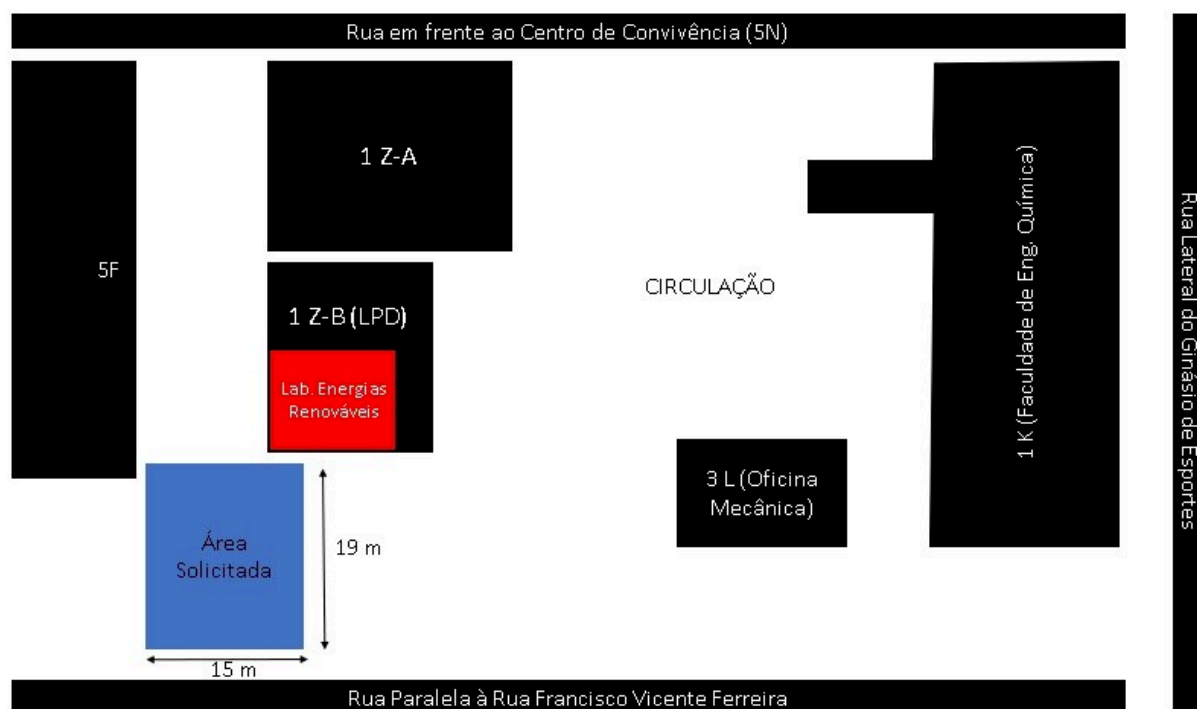


Figura 3.6 – Planta baixa da localização da área solicitada para instalação das unidades.

Os testes foram realizados nesse espaço, considerando o local aberto, sem interferência de sombras, construções ou demais instalações.

### 3.3 Caracterização do Carbonato de Cálcio para os testes de decomposição

A matéria-prima empregada neste trabalho foi o Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) P.A. da marca Synth, com 99% de pureza e massa molecular de  $100,09 \text{ g.mol}^{-1}$ .

#### 3.3.1 Densidade

A densidade real do material foi determinada em tréplica através da técnica de picnometria a gás Hélio (*Micromeritics – Accuumpyc 1331*).

### 3.3.2 Análise Granulométrica

A análise granulométrica do carbonato de cálcio foi realizada pela técnica de difração a *laser*, a qual é fundamentada no fenômeno de que as partículas dispersam a luz em uma escala de ângulos específicos e característicos do seu tamanho (SOARES, 2007).

As análises foram feitas utilizando o equipamento *Mastersizer 2000* da Malvern e água destilada como dispersante. Foram realizadas cinco réplicas.

Para o tratamento dos resultados e obtenção da distribuição granulométrica para o carbonato de cálcio, utilizou-se o Modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), descrito na Equação (3.15), em que  $D_{63,2}$  e  $n$  representam os parâmetros do modelo estimados pelo *software* Statistica®.

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{dp}{D_{63,2}}\right)^n\right) \quad (3.15)$$

### 3.3.3 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica analisa a variação de massa de uma determinada amostra em função da temperatura, fornecendo a curva termogravimétrica (TG), da qual realizada a primeira derivada, obtém-se a curva de DTG, de onde se pode visualizar com mais facilidade a faixa de temperatura em que ocorre uma etapa de decomposição, por exemplo.

Neste trabalho, essa técnica foi aplicada a fim de obter a decomposição térmica do carbonato de cálcio, em função da temperatura, a partir de curvas de perda de massa TG e DTG. Para tal foi utilizado um analisador termogravimétrico da marca *Shimadzu* DTG 60. As condições de análise estudadas foram taxa de aquecimento de  $15^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ ; atmosfera inerte: nitrogênio; fluxo de gás:  $30 \text{ mL}.\text{min}^{-1}$ ; massa da amostra: aproximadamente 10 mg; faixa de temperatura: ambiente até  $900^{\circ}\text{C}$

Para a determinação da cinética de degradação térmica do carbonato de cálcio foi utilizado o modelo de reação global. A fim de calcular seus parâmetros cinéticos, foram empregados dados de perda de massa provenientes da termogravimetria dinâmica.

De modo geral, a conversão ( $x$ ) pode ser definida pela Equação (3.16), que expressa a perda de massa do  $\text{CO}_2$  formado na reação de calcinação do  $\text{CaCO}_3$ .

$$x = \frac{m_o - m_t}{m_o - m_f} \quad (3.16)$$

em que  $m_o$  é a massa inicial,  $m_t$  é a massa medida no instante  $t$  e  $m_f$  é a massa final da análise.

Assim, a taxa de decomposição térmica pode ser descrita como uma função da temperatura  $k(T)$  e da conversão  $f(x)$  conforme a Equação (3.17).

$$\frac{d(x)}{d(t)} = f(x) \cdot k(T) \quad (3.17)$$

Considerando a constante da taxa ( $k(T)$ ) expressa pela equação de Arrhenius, dada pela Equação (3.18) e assumindo que a reação de decomposição do carbonato de cálcio é uma reação que segue uma cinética de ordem  $n$ , conforme Equação (3.19), temos que a taxa da conversão da reação global de decomposição pode ser escrita como na Equação (3.20).

$$k = k_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3.18)$$

$$f(x) = (1 - x)^n \quad (3.19)$$

$$\frac{dx}{dt} = k_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) (1 - x)^n \quad (3.20)$$

em que  $x$ ,  $k_o$ ,  $E_a$ ,  $n$  são a conversão, o fator pré-exponencial, a energia de ativação aparente e a ordem de reação,  $t$  é o tempo,  $T$  é a temperatura e  $R$  a constante universal dos gases.

Alguns autores como Lira *et al.* (2010) e Santos (2011), mostraram que a utilização da relação de Arrhenius na descrição da velocidade de reação pode

apresentar problemas de não linearidade paramétrica, os quais podem conduzir a uma estimativa equivocada dos parâmetros cinéticos, levando-os a se tornarem correlacionados.

Para garantir que a estimativa dos parâmetros cinéticos não apresentasse problemas de não linearidade paramétrica, foi utilizado o Modelo de Reação Global Reparametrizado. Assim, define-se a variável  $k_0$  como:

$$k_0 = \frac{k_0^*}{\exp\left[-\frac{E_a}{R} \frac{1}{T^*}\right]} \quad (3.21)$$

em que  $T^*$  é uma temperatura de referência (273 K). Substituindo a Equação (3.21) na Equação (3.18), temos a Equação (3.22).

$$k(T) = \frac{k_0^*}{\exp\left[-\frac{E_a}{R} \frac{1}{T^*}\right]} \exp\left[-\frac{E_a}{RT}\right] = k_0^* \exp\left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^*}\right)\right] \quad (3.22)$$

Na Equação (3.23) é definida a relação entre o fator pré-exponencial e a nova variável reparametrizada  $\omega$  que o representará, enquanto na Equação (3.24) é relacionada a energia de ativação  $E_a$  e sua variável representativa  $\gamma$ . Na Equação (3.25) é definida a temperatura relativa  $T'$ .

$$k_0^* = \exp(\omega) \quad (3.23)$$

$$\frac{E_a}{R} = \exp(\gamma) \quad (3.24)$$

$$T' = \frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \quad (3.25)$$

Substituindo as Equações (3.23), (3.24) e (3.25) na Equação (3.22), tem-se a forma final reparametrizada da velocidade da reação:

$$k(T) = \exp(\omega) \exp[-T' \exp(\gamma)] \quad (3.26)$$

Assim, o modelo de reação global reparametrizado pode ser descrito pela Equação (3.27) e sua condição inicial dada pela Equação (3.28).

$$\frac{dx}{dt} = k(1-x)^n = \exp(\omega) \exp[-T' \exp(\gamma)] (1-x)^n \quad (3.27)$$

$$x(t_0) = 0 \quad (3.28)$$

A fim de obter os resultados em termos de perda de massa no tempo, pode-se relacionar os dados de conversão e perda de massa de acordo com a Equação (3.29). Os parâmetros desconhecidos,  $\omega$  e  $\gamma$ , são determinados pela avaliação dos dados experimentais por meio de um ajuste não linear, que minimiza a função objetivo pelo método de mínimos quadrados (S), definida pela Equação (3.30), conforme Santos (2011).

$$\frac{dm^{calc}}{dt} = -(m_0 - m_\infty) \frac{dx}{dt} \quad (3.29)$$

$$S = \sum_{j=1}^N ((m)_j^{obs} - (m)_j^{calc})^2 \quad (3.30)$$

na qual o subscrito  $j$  se refere à sequência de dados experimentais no tempo,  $(dm/dt)^{obs}$  representa os valores da derivada da massa no tempo observados experimentalmente, enquanto  $(dm/dt)^{calc}$  representa a taxa de perda de massa calculada pela Equação (3.29).

Os parâmetros do modelo de reação global foram estimados através do Método de Evolução Diferencial (DE), utilizando o *software* MATLAB, adaptando-se o código computacional apresentado por Santos (2011).

Dessa forma, será possível obter uma estimativa da Energia de Ativação necessária para que ocorra a reação em regime cinético.

### 3.4 Métodos Experimentais

Nesta seção serão abordadas a escolha do reator de calcinação, os métodos experimentais para a dinâmica de aquecimento dos corpos de prova e para a decomposição do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).



### 3.4.1 Escolha do Reator de Calcinação

Para a escolha do material do reator de calcinação foram testados: porcelana, ferro fundido e carbetto de silício, apresentados na Figura 3.7. Nos três materiais foi observada a temperatura de fusão, o diâmetro externo, a massa e a cor. É importante conhecer a temperatura de fusão do material, haja visto que ele será submetido a temperaturas acima de  $600^{\circ}\text{C}$ . Em relação ao diâmetro externo é ideal que ele ocupe toda a mancha focal da lente de Fresnel utilizada nos experimentos em questão; a massa, por outro lado, é importante para garantir que não haja problemas de transferência de massa, visto que massas muito grandes a prejudicam. Além disso, é importante a escolha de um material que seja opaco e que tenha a menor refletividade possível.



Figura 3.7 – Possíveis reatores para a calcinação de Carbonato de Cálcio: a) porcelana; b) ferro fundido; c) carbetto de silício.

Assim, foram utilizados cadinhos de porcelana da Chiarotti, próprios para a calcinação de materiais sólidos e pastosos, normalmente em muflas. Eles suportam temperaturas entre  $1000^{\circ}\text{C}$  e  $1200^{\circ}\text{C}$ .

O recipiente de ferro fundido utilizado passou por um pré-tratamento em mufla, a fim de garantir que não houvesse interações do seu material com o carbonato de cálcio quando submetido a altas temperaturas. Assim, foi deixado na mufla por 40 min, a uma temperatura de  $800^{\circ}\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $30^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ .

O Carbetto de Silício (SiC) suporta temperaturas acima de  $1400^{\circ}\text{C}$ , sendo muito promissor, uma vez que apresenta cor preta e é um material leve. Os três materiais, passaram por testes utilizando a lente de Fresnel de  $1\text{ m}^2$ , com o intuito de verificar qual seria a melhor opção para o reator de calcinação. Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais informações dos reatores testados.

Tabela 3.3 – Material e dimensões dos recipientes testados para o reator de calcinação.

Material	$H$ (cm)	$D_e$ (cm)	$D_i$ (cm)	$e$ (cm)	$M$ (g)
Porcelana	4,0	9,6	8,8	0,4	91,2
Ferro Fundido	5,4	11,2	9,4	0,9	703,8
Carbeto de Silício - SiC	4,0	5,7	4,8	0,5	91,6

### 3.4.2 Dinâmica de Aquecimento

Os experimentos de dinâmica de aquecimento foram realizados com a finalidade de determinar a rampa de aquecimento e a temperatura máxima atingida pelo corpo de prova submetido ao concentrador solar constituído pela lente de Fresnel. Para isso, quatro corpos de prova, sendo dois de alumínio e dois de cobre, foram utilizados como absorvedores da luz solar refratada pela lente.

Os corpos de prova foram pintados de preto fosco e posicionados na região focal. Vale ressaltar que para os experimentos de dinâmica de aquecimento foi utilizada a unidade experimental de lente de Fresnel de 0,09 m<sup>2</sup>, uma vez que o objetivo era determinar o seu comportamento.

Além disso, um termopar do tipo K, foi instalado no centro dos corpos de prova, a fim de registrar as temperaturas minuto a minuto, durante o experimento, até que fosse atingido o estado estacionário, ou seja, até que não houvessem alterações significativas nas temperaturas.

O tempo total de experimento foi de 38 min para os corpos de prova de alumínio e de 30 min para os de cobre. Durante os ensaios experimentais, a radiação solar local foi acompanhada com o uso de um solarímetro portátil acoplado na parte superior do suporte da unidade experimental. Os testes foram realizados em dias de céu aberto e radiação média acima de 800 W.m<sup>-2</sup>.

A partir dos resultados experimentais, foi proposta uma nova simulação, considerando as condições operacionais do experimento, com o objetivo de verificar a capacidade preditiva do modelo de dinâmica de aquecimento nas condições testadas experimentalmente.

### 3.4.3 Decomposição do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )

Para a realização dos experimentos de decomposição do Carbonato de Cálcio, foi utilizada a unidade de lente de Fresnel de área  $1 \text{ m}^2$ . Apesar da área de  $0,09 \text{ m}^2$  atender ao propósito de caracterizar a dinâmica de aquecimento da Lente de Fresnel, não foram alcançadas temperaturas satisfatórias para os testes de decomposição do carbonato de cálcio acima de  $600^\circ\text{C}$ , quase sempre em patamares inferiores a  $400^\circ\text{C}$ .

Inicialmente, foram realizados testes exploratórios e preliminares, com a área total de  $1 \text{ m}^2$ , a fim de determinar as melhores condições para a realização dos experimentos de decomposição.

Nessa fase, utilizou-se lona plástica circundando a área onde a unidade foi instalada, a fim de minimizar as perdas térmicas convectivas devido à velocidade do vento. Também foram testados os materiais escolhidos anteriormente para o reator de calcinação.

Na Tabela 3.4 são apresentados os seis experimentos preliminares realizados. Todos os testes foram realizados no horário entre 10:30 e 14:00 h e em dias ensolarados na ausência de nuvens.

Determinou-se os tempos de 6, 10, 12, 15 e 20 min com base na rampa de aquecimento obtida na dinâmica de aquecimento simulada para o carbonato de cálcio, bem como as massas de carbonato de cálcio de 1, 3 e 5 g para utilização no reator.

Tabela 3.4 – Testes exploratórios realizados na lente de  $1 \text{ m}^2$ .

Teste	A ( $\text{m}^2$ )	G ( $\text{W.m}^{-2}$ )	t (min)	$M_{\text{CaCO}_3}$ (g)
1	1	935	6	1,00
2	1	946	12	1,00
3	1	894	10	5,00
4	1	875	10	3,00
5	1	903	20	1,00
6	1	901	15	1,00

A partir dos ensaios exploratórios, determinou-se que os experimentos de decomposição térmica do carbonato de cálcio seriam realizados utilizando áreas reduzidas a fim de verificar a influência da área da lente. Portanto, realizaram-se duas reduções na área da lente de Fresnel de  $1 \text{ m}^2$  para  $0,42 \text{ m}^2$  e para  $0,79 \text{ m}^2$ , utilizando papel pardo para cobrir a área inutilizada nos testes.

Para os experimentos de decomposição, o tempo de exposição solar foi de 30 min para todos os testes, conforme determinado a partir dos ensaios preliminares. Além disso, o reator de calcinação utilizado foi o escolhido preliminarmente entre os três materiais testados. Os ensaios foram realizados entre 10:30 e 14:00 h, garantindo a incidência solar desejada, considerando dias ensolarados e de céu limpo, sem nuvens, obtendo radiação média entre 800 e 900 W.m<sup>-2</sup>

Na Tabela 3.4 são apresentados os experimentos realizados para a decomposição térmica do CaCO<sub>3</sub>. Foram realizados seis experimentos, sendo três com área de 0,42 m<sup>2</sup> e três com área de 0,79 m<sup>2</sup>. As massas foram variadas entre 1, 3 e 5 g, a fim de verificar a influência da massa de carbonato de cálcio na reação química de decomposição.

Vale ressaltar que a conversão de CaCO<sub>3</sub> em CaO foi acompanhada a partir da variação de massa com base na estequiometria da reação química de decomposição.

Tabela 3.5 – Experimentos realizados para a decomposição do CaCO<sub>3</sub>.

Teste	A (m <sup>2</sup> )	G (W.m <sup>-2</sup> )	t (min)	M <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> (g)
1	0,42	980	30	1,00
2	0,42	860	30	3,00
3	0,42	970	30	5,00
4	0,79	975	30	1,00
5	0,79	946	30	3,00
6	0,79	938	30	5,00

Diante do material e dos métodos apresentados, o próximo capítulo apresenta os resultados obtidos e as discussões referentes.

---

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Este capítulo apresenta os resultados obtidos neste trabalho e será abordado em três seções: Modelo da Dinâmica de Aquecimento da lente de Fresnel, caracterização do Carbonato de Cálcio e os Resultados Experimentais para a decomposição térmica.

A primeira parte abrange a previsão teórica da dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando os corpos de prova de alumínio, cobre e carbonato de cálcio. Em um segundo momento, serão tratados os resultados obtidos para as análises de densidade e granulometria, além das análises de termogravimetria e suas relações com a literatura.

Por fim, na última seção deste capítulo, serão abordados: uma comparação entre a previsão teórica obtida a partir das simulações e os resultados dos testes experimentais para o alumínio e o cobre, verificando a dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel; a escolha do reator de calcinação; os experimentos exploratórios e preliminares realizados, bem como os ensaios de decomposição térmica do carbonato de cálcio.

#### **4.1 Previsão Teórica da Dinâmica de Aquecimento**

A partir da implementação da matriz de planejamento (Tabela 3.1), obteve-se a estimativa das temperaturas de equilíbrio e tempos de aquecimento para o alumínio, o cobre e o carbonato de cálcio, cujos principais resultados podem ser visualizados nas Figuras 4.1 a 4.3.

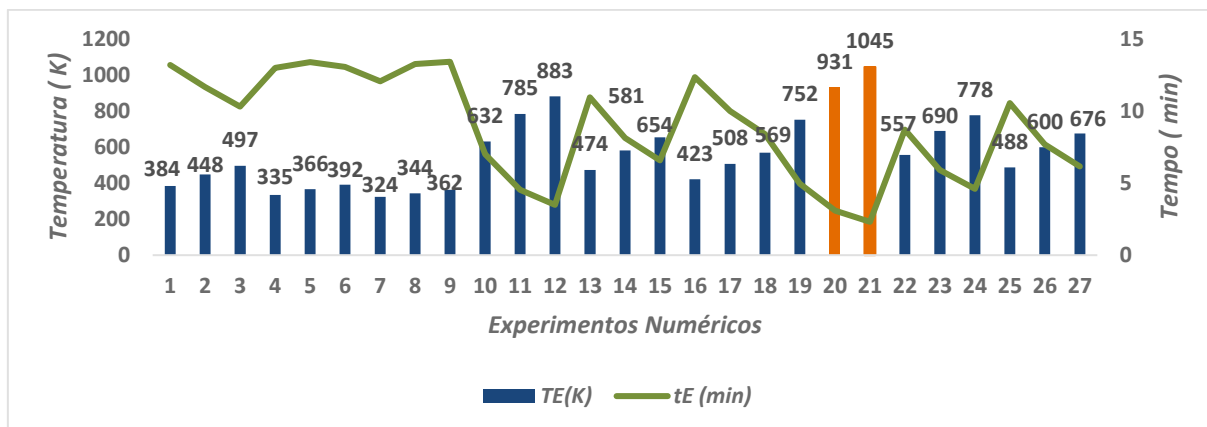


Figura 4.1 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o alumínio.

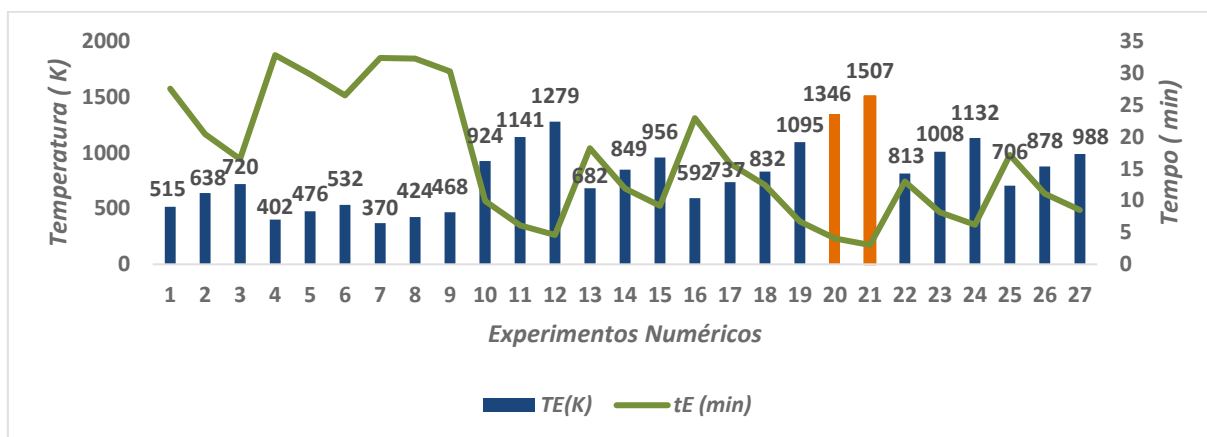


Figura 4.2 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o cobre.

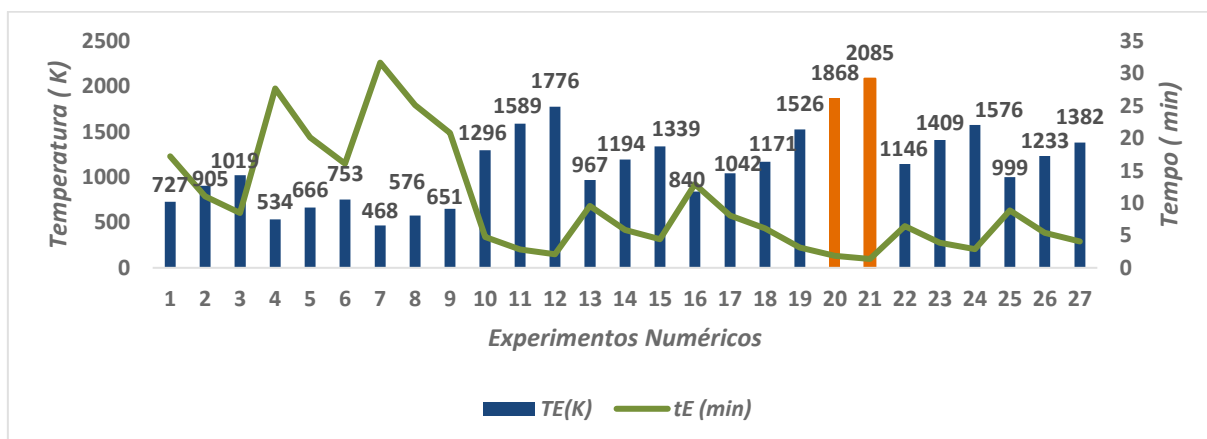


Figura 4.3 – Temperaturas de Equilíbrio e tempos de aquecimento para o Carbonato.

A partir das Figuras apresentadas anteriormente, percebe-se que para menores valores do agrupamento dimensional ( $GA.M^{-1}$ ) são atingidas menores temperaturas de equilíbrio, em maiores tempos de aquecimento. Um exemplo desta constatação

pode ser visto, por exemplo, com as informações obtidas nas condições operacionais das simulações 4 e 7 da matriz de planejamento, para os três materiais analisados, nas quais se tem valores de 4167 e 2500 W.kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para o agrupamento dimensional. Os dados apresentados encontram-se disponíveis no Apêndice A.

Das dinâmicas de aquecimento dos distintos corpos de prova, foi observado que as principais respostas ( $T_E$  e  $t_E$ ) são altamente influenciadas pelos fatores área ( $A$ ), fluxo de radiação ( $G$ ) e a carga mássica envolvida ( $M$ ). Neste caso, cargas mássicas maiores combinadas a menores fluxos de radiação e menores áreas de refração são condições desfavoráveis para os objetivos deste estudo, por fornecerem temperaturas mais brandas, muitas vezes inadequadas às transformações químicas por decomposição térmica.

Contrariamente, maiores valores do agrupamento dimensional ( $GA.M^{-1}$ ) forneceram maiores valores de temperatura de equilíbrio, os quais foram atingidos em menores tempos de aquecimento. Portanto, foi observado que as condições para se obter maiores temperaturas com menores tempos, as quais são mais favoráveis às reações químicas endotérmicas, ocorrem quando são utilizadas menores massas combinadas com maiores áreas de lente e fluxo de radiação, tal como pôde ser observado para as simulações 20 e 21 da Matriz de Planejamento.

Conclusões análogas foram relatadas por Andrade *et al.* (2016) que também avaliaram fatores e condições operacionais semelhantes às contidas nesta dissertação. Segundo Andrade *et al.* (2016), para maiores tamanhos do coletor solar e menores massas, teve-se temperaturas de equilíbrio superiores a 800°C em menos de 2 min de aquecimento solar, o que se mostra adequado às conversões químicas endotérmicas.

Assim, nota-se após análises das Figuras 4.1 a 4.3, que existe uma relação direta entre as temperaturas de equilíbrio e o agrupamento dimensional ( $GA.M^{-1}$ ), possibilitando o ajuste dos parâmetros contidos na Equação 3.14.

A representação gráfica dos três ajustes efetuados para o corpo de prova de alumínio, cobre e carbonato de cálcio estão representados nas Figuras 4.4 a 4.6, respectivamente.

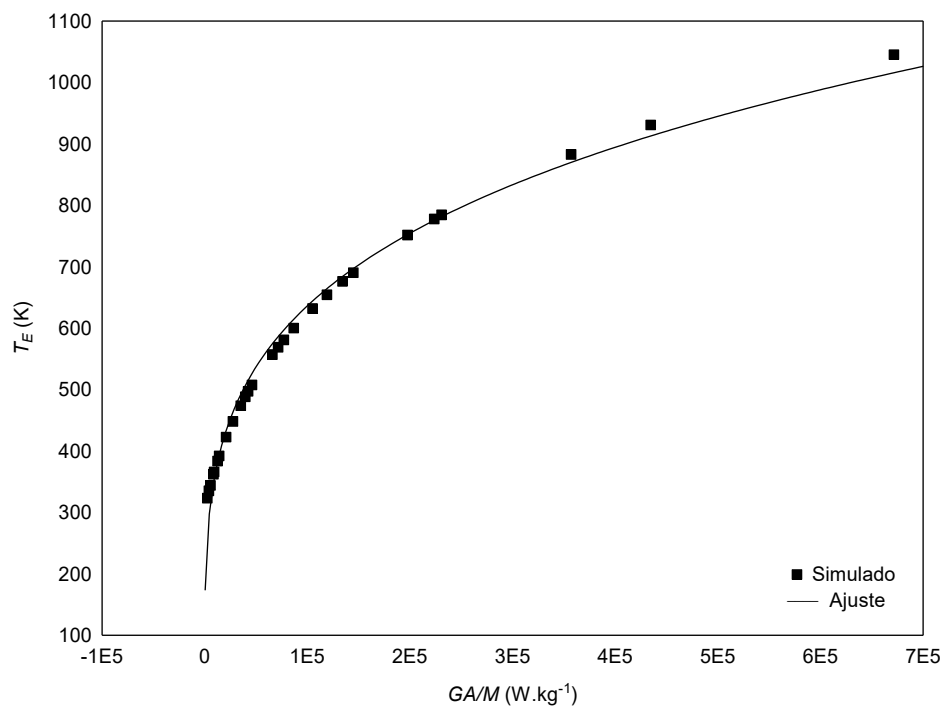


Figura 4.4 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de alumínio.

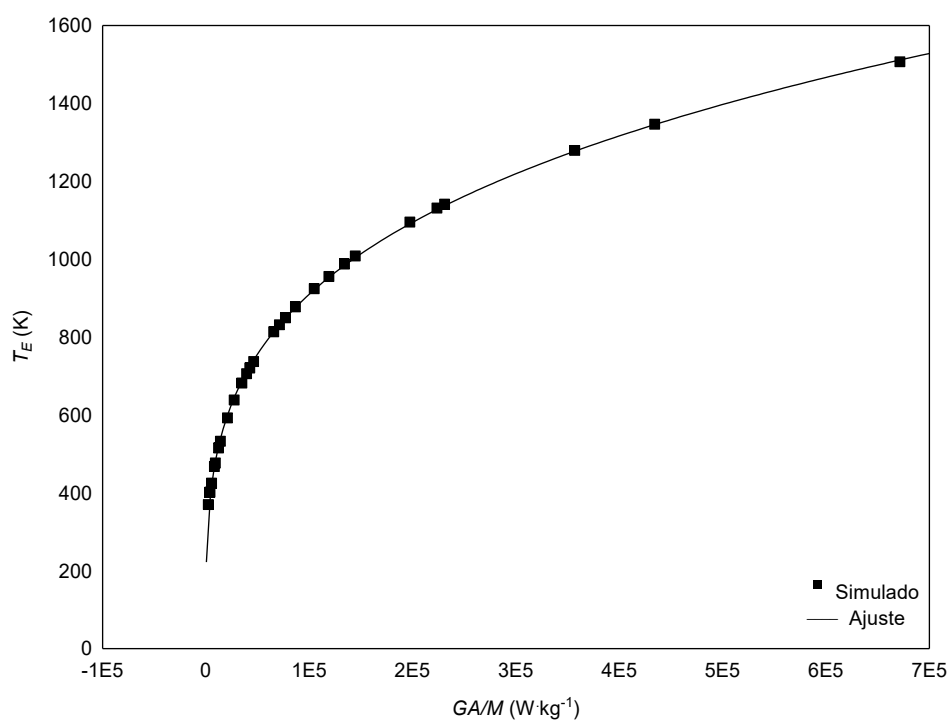


Figura 4.5 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de cobre.



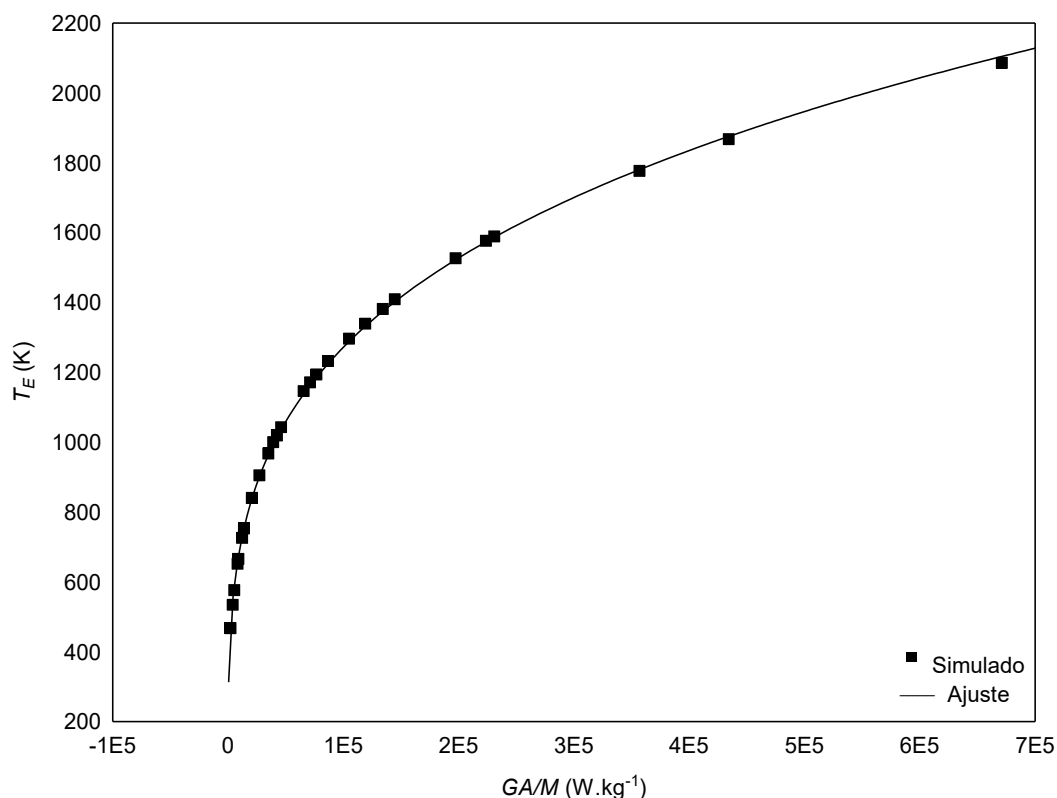


Figura 4.6 – Comportamento do Agrupamento Dimensional com a Temperatura de Equilíbrio do corpo de prova de carbonato de cálcio.

Somente para fins de registro, os parâmetros estimados para as informações das Figuras 4.4 a 4.6 são apresentados na Tabela 4.1.

Percebe-se pela Tabela 4.1 que o parâmetro  $k$  certamente irá depender das propriedades do material analisado, como se observa pela relação dele com a difusividade térmica ( $\alpha$ ). Por outro lado,  $m$  manteve-se praticamente constante, independentemente do tipo de material utilizado para o corpo de prova.

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para correlação da Temperatura de Equilíbrio em função do Agrupamento Dimensional para os corpos de prova Alumínio, o Cobre e o Carbonato de Cálcio.

Material	$k$ (kgK.W <sup>-1</sup> )	$m$	$R^2$	$\alpha$ (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
Alumínio	37,638	0,246	0,9938	98,800.10 <sup>-6</sup>
Cobre	42,361	0,266	0,9997	117,000. 10 <sup>-6</sup>
CaCO <sub>3</sub>	60,399	0,265	0,9998	-

Após a análise dos efeitos das principais variáveis operacionais sobre a Temperatura de Equilíbrio, foram simuladas as dinâmicas de aquecimento de corpos de prova para uma lente de Fresnel comercial de  $0,09 \text{ m}^2$ , a fim de verificar os patamares térmicos que poderiam ser alcançados, bem como avaliar a necessidade ou não da substituição desta lente por uma outra maior para os testes de decomposição térmica do carbonato de cálcio.

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas as dinâmicas de aquecimento simuladas para os corpos de prova de alumínio e cobre, respectivamente, a fim de se verificar as taxas de aquecimento de cada material, frente à captação da luz solar por uma lente de Fresnel.

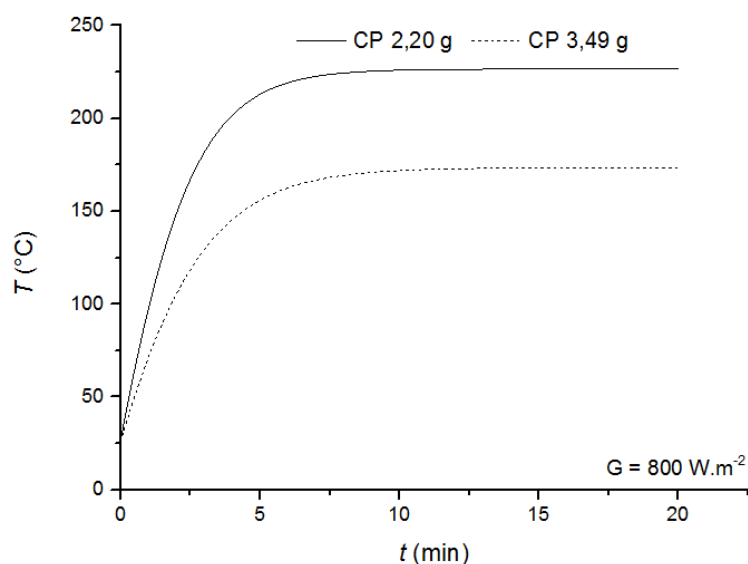


Figura 4.7 – Simulações da dinâmica de aquecimento de uma lente de Fresnel de  $0,09 \text{ m}^2$  de área para o absorvedor de alumínio.

Com os resultados disponíveis nas Figuras 4.7 e 4.8, foi feito um consolidado das temperaturas de equilíbrio e das taxas de aquecimento, cujos resultados são mostrados na Tabela 4.2.

A partir das informações contidas na Tabela 4.3, o aquecimento por lente de Fresnel dos dois materiais seria capaz de proporcionar taxas de aquecimento na ordem de  $14 \text{ a } 24^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$ , podendo ser aproveitada para algumas operações unitárias ou transformações químicas. As massas dos corpos de prova foram apenas um pretexto para estimativa das taxas de aquecimento. Porém, os quatro arranjos já

sinalizavam agrupamentos dimensionais menores que  $32727 \text{ W.kg}^{-1}$ , fornecendo, portanto, temperaturas menores que  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

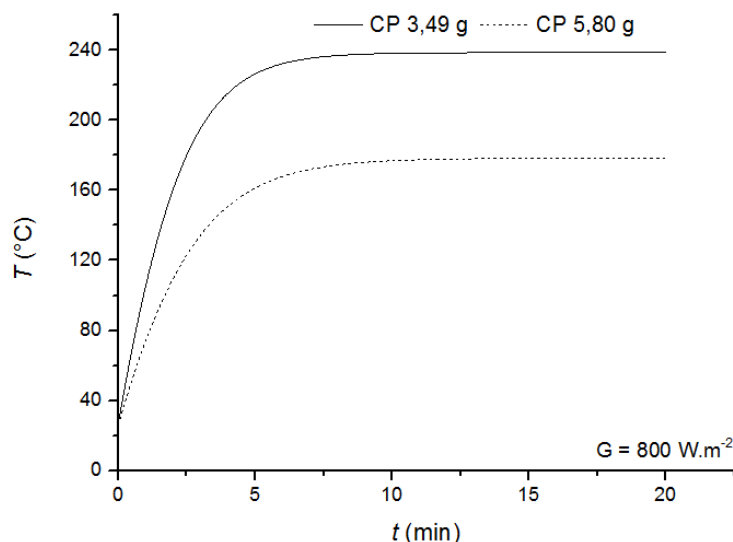


Figura 4.8 – Simulações da dinâmica de aquecimento de uma lente de Fresnel de  $0,09 \text{ m}^2$  de área para o absorvedor de cobre.

Tabela 4.2 – Temperaturas de Equilíbrio e taxas de aquecimento obtidos por simulação para os corpos os corpos de prova com radiação média de  $800 \text{ W.m}^{-2}$  e área de  $0,09 \text{ m}^2$ .

Material	$T_E (^{\circ}\text{C})$	Taxa ( $^{\circ}\text{C.min}^{-1}$ )	$GA.M^{-1} (\text{W.kg}^{-1})$
Al – CP 2,20 g	226,02	21,80	32727
Al – CP 3,49 g	172,79	14,54	20630
Cu – CP 3,49 g	238,21	23,89	20630
Cu – CP 5,80 g	177,73	15,22	12413

Nota-se que ao comparar os corpos de prova de alumínio e cobre, tem-se que as taxas de aquecimento para o alumínio são menores que as do cobre, apesar das temperaturas de equilíbrio alcançadas serem próximas. Esse fato é justificado pelas propriedades distintas dos materiais, uma vez que o cobre apresenta calor específico de  $385 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  contra  $900 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  do alumínio.

Da mesma maneira, quando comparados entre si, os absorvedores apresentaram comportamento adequado e semelhantes, visto que, tanto o corpo de prova maior do alumínio quanto o do cobre atingiram temperaturas de equilíbrio

menores com menores rampas de aquecimento, enquanto os corpos de prova menores de ambos alcançaram maiores temperaturas de equilíbrio e maiores rampas de aquecimento, o que é justificado pela diferença de massa existente entre os corpos de prova.

Apesar das simulações teóricas terem previsto a ordem de grandeza das taxas de aquecimento com a lente de Fresnel, percebe-se, diante das massas utilizadas, que uma lente de área  $0,09 \text{ m}^2$  não se adequaria às condições necessárias neste estudo, uma vez que suas temperaturas de equilíbrio foram baixas, quando comparadas às temperaturas necessárias para a decomposição térmica do carbonato de cálcio num patamar superior a  $600^\circ\text{C}$ .

Somente a título de exemplo, para uma lente de Fresnel de  $0,09 \text{ m}^2$  submetida a uma radiação de  $800 \text{ W.m}^{-2}$ , a fim de que a temperaturas fossem maiores que  $600^\circ\text{C}$ , cargas mássicas menores que  $0,19$  e  $0,84 \text{ g}$  deveriam ser necessariamente utilizadas para os corpos de prova de alumínio e cobre, respectivamente. Tais massas mostram-se demasiadamente pequenas, indicando que a lente de  $0,09 \text{ m}^2$  seria inadequada para prover a decomposição do carbonato de cálcio.

No caso de ensaios de decomposição do carbonato de cálcio com essa lente de Fresnel de  $0,09 \text{ m}^2$ , vale mencionar que as cargas mássicas mencionadas anteriormente ( $0,19$  ou  $0,84 \text{ g}$ ) já estão contemplando a soma das massas do reagente (carbonato) e reator (cadinho). Portanto, visando aos futuros testes de decomposição térmica do carbonato de cálcio, foi necessária uma segunda lente de Fresnel com área de  $1 \text{ m}^2$ .

## **4.2 Caracterização do Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )**

Como dito anteriormente, o Carbonato de Cálcio empregado nos ensaios experimentais neste trabalho foi do tipo P.A. com 99% de pureza. Para caracterizá-lo foram realizadas análises de densidade utilizando picnometria a gás hélio, granulometria através de difração a *laser* e análises termogravimétricas, as quais tem seus resultados descritos abaixo.

### **4.2.1 Densidade**

O valor da densidade real encontrado para o carbonato de cálcio foi de  $2,8250 \pm 0,0041 \text{ g.cm}^{-3}$ . Souto (2008) cita densidade de  $2,92 \text{ g.cm}^{-3}$  a  $2,95 \text{ g.cm}^{-3}$  para o carbonato de cálcio.

#### 4.2.2 Granulometria

Os dados experimentais obtidos a partir da análise granulométrica, realizada no equipamento *Mastersizer*, foram ajustados pelo Modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB), utilizando o *Software Statistica*® e estão apresentados na Figura 4.9.

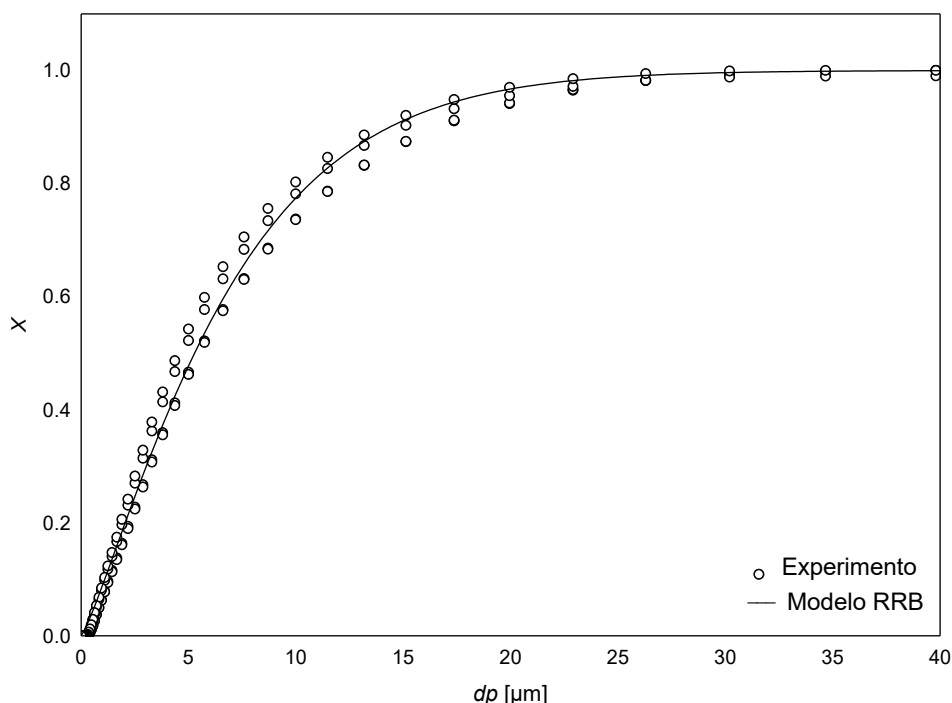


Figura 4.9 – Distribuição granulométrica do Carbonato de Cálcio representada pelo Modelo Rosin-Rammler-Bennet (RRB).

Pela Figura 4.9 observa-se que 95% das partículas apresentaram diâmetro menor ou igual a  $20 \mu\text{m}$ . As informações de distribuição granulométrica adequaram-se satisfatoriamente ao modelo RRB ( $R^2 = 0,9988$ ), cujos parâmetros  $D_{63,2}$  e  $n$  foram, respectivamente,  $7,173 \mu\text{m}$  e  $1,1993$ , conforme Equação (4.1).

$$X = 1 - \exp\left(-\left(\frac{dp}{7,173}\right)^{1,1993}\right) \quad (4.1)$$

### 4.2.3 Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica foi realizada com o objetivo de avaliar as regiões de alta calcinação, ou seja, a que temperaturas ocorreriam reduções significativas de massa, prevendo assim, as temperaturas de decomposição térmica do carbonato de cálcio. Na Figura 4.10 é apresentada a curva de perda de massa (TG), sob as condições de taxa de aquecimento de  $15^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$  e temperatura final de  $900^{\circ}\text{C}$ .

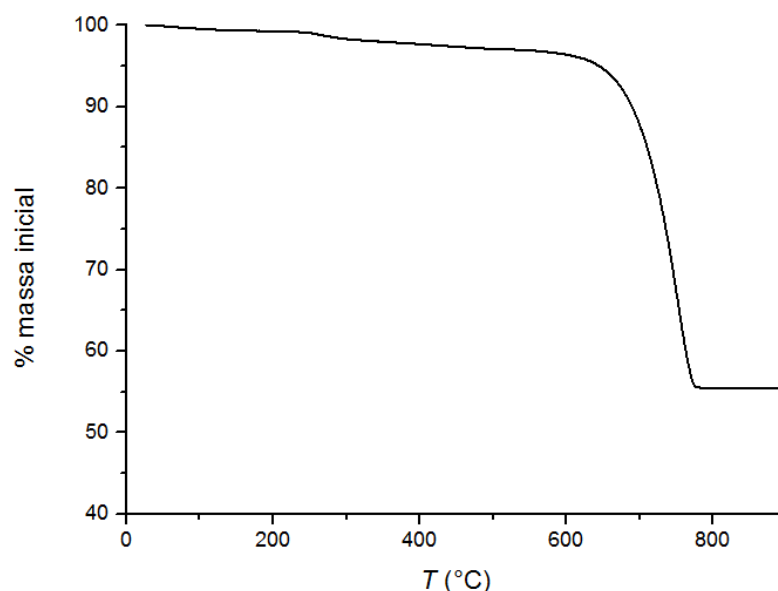


Figura 4.10 – Curva experimental da perda de massa em função da temperatura para a taxa de aquecimento de  $15^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ .

De acordo com a Figura 4.10, houve uma perda de massa de cerca de 44% após a calcinação, ou seja, todo o carbonato de cálcio empregado na análise foi convertido em óxido de cálcio e gás carbônico, conforme já era esperado em face da estequiometria para este tipo de reação química.

Para visualizar com maior clareza os eventos ocorridos no TG, realizou-se a derivada dos resultados, obtendo a curva de DTG apresentada na Figura 4.11. Nota-se que ocorreu um pico de redução máxima por volta de  $750^{\circ}\text{C}$ .

Observando os termogramas apresentados, percebe-se que a decomposição do carbonato de cálcio ocorre entre  $600^{\circ}\text{C}$  e  $800^{\circ}\text{C}$ , ou seja, esse comportamento

induz que em temperaturas menores que 600°C não há redução de massa significativa, isto é, o material não se decompõe.

Portanto, se torna inadequado operar o reator de calcinação em temperaturas inferiores a esta. Da mesma forma, é notável que a partir de 800°C todo o material já fora degradado. Qualquer incremento térmico acima dos 800°C, apenas representaria um consumo inócuo de energia que oneraria, sobremaneira, o processo de calcinação.

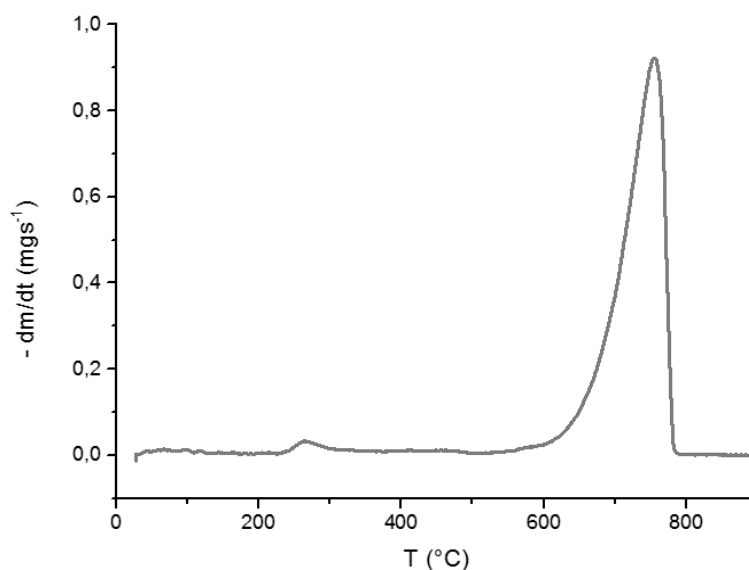


Figura 4.11 – Curva experimental da derivada da perda de massa em função da temperatura para a taxa de aquecimento de 15°C.min<sup>-1</sup>.

Palandri *et al.* (1993) realizaram análises termogravimétricas à taxa de aquecimento de 10°C.min<sup>-1</sup>, observando que o processo de decomposição também ocorreu na faixa de 600°C a 800°C com perda de massa de 44%. No mesmo sentido, Barbosa (2014) realizou análises termogravimétricas para a caracterização de seu material, entretanto, neste caso utilizou-se resíduo de calcário, observando uma redução acentuada de massa entre 650°C e 800°C.

A cinética de degradação térmica do carbonato de cálcio foi estudada por meio do modelo de reação global reparametrizado, apresentado no capítulo anterior, com o intuito de obter os parâmetros cinéticos a partir dos dados de perda de massa, decorrentes da análise termogravimétrica.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados obtidos para a energia de ativação e ordem da reação da decomposição do carbonato de cálcio.

Tabela 4.3 – Parâmetros cinéticos obtidos segundo o modelo de reação global.

	<b>Modelo Reparametrizado</b>		<b>Modelo Não Reparametrizado</b>
Parâmetros	$\omega = -139,6003$	$k_0$	$2,8218 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$
	$\gamma = 10,7486$	$E_a$	$387,15 \text{ kJ.mol}^{-1}$
	$n = 0,6$	$n$	$0,6$
Curva TG	$R^2 = 0,9982$ DESVIO (%) = 0,7046		
Curva DTG	$R^2 = 0,9853$ DESVIO (%) = 3,8170		

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são mostrados os resultados previstos pelo modelo e aqueles obtidos experimentalmente para a taxa de aquecimento de  $15^\circ\text{C.min}^{-1}$  utilizando os parâmetros cinéticos estimados por Evolução Diferencial. Nota-se uma boa concordância entre eles, confirmada pelo baixo desvio encontrado.

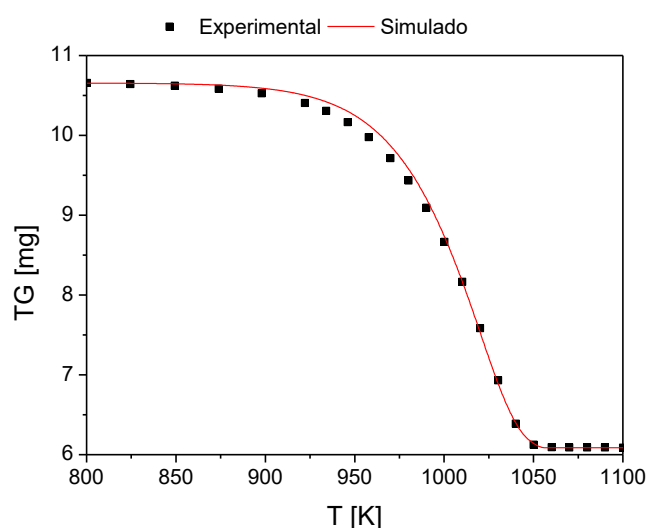


Figura 4.12 – Comparação entre os dados experimentais e calculados usando o Modelo de Reação Global: Curva TG.

Constatou-se por meio do modelo que a reação é de ordem 0,6 e apresenta energia de ativação de  $387,15 \text{ kJ.mol}^{-1}$  ( $3868,14 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ). Dollimore *et al.* (1996) encontraram valores similares para a energia de ativação do carbonato de cálcio, considerando a reação de primeira ordem. Na ocasião fora encontrado o valor de  $391 \text{ kJ.mol}^{-1}$ . Chen e Liu (2010) encontraram energias de ativação próximas a  $370 \text{ kJ.mol}^{-1}$  utilizando taxas de aquecimento de 5, 10, 15 e  $20 \text{ K.min}^{-1}$ .



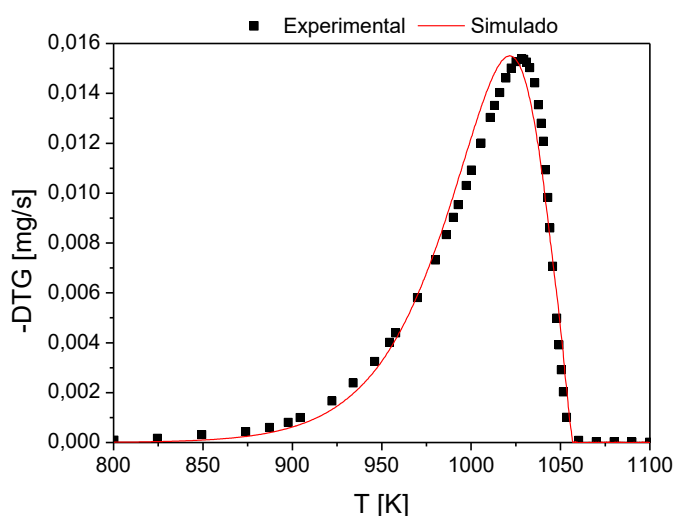


Figura 4.13 – Comparação entre os dados experimentais e calculados usando o Modelo de Reação Global: Curva DTG.

### 4.3 Ensaios Experimentais

Nesta seção será abordada uma comparação entre a previsão teórica obtida a partir das simulações e os resultados dos testes experimentais para o alumínio e o cobre. Além disso, serão apresentados os testes preliminares realizados, bem como a escolha do reator de calcinação e a decomposição térmica do carbonato de cálcio.

#### 4.3.1 Dinâmica de Aquecimento

A rampa de aquecimento foi determinada experimentalmente para o alumínio e o cobre, utilizando a Lente de Fresnel de  $A = 0,09 \text{ m}^2$ . Nas Figuras 4.14 e 4.15 é apresentada uma comparação entre a previsão teórica obtida a partir da simulação e os resultados obtidos experimentalmente para o corpo de prova de alumínio.

Para a menor peça de alumínio (2,20 g), o experimento teve duração de 38 min, iniciando com uma temperatura de  $28^\circ\text{C}$ . O corpo de prova atingiu a temperatura de equilíbrio de  $221^\circ\text{C}$  aos 31 min de experimento. A radiação média durante os ensaios foi de  $860 \text{ W.m}^{-2}$ .

Por sua vez, para a maior peça de alumínio (3,49 g), o experimento também durou 38 min, porém iniciou a temperatura de  $38^\circ\text{C}$  e alcançou a temperatura de equilíbrio de  $244^\circ\text{C}$  aos 28 min de experimento. A radiação média foi de  $906 \text{ W.m}^{-2}$ .

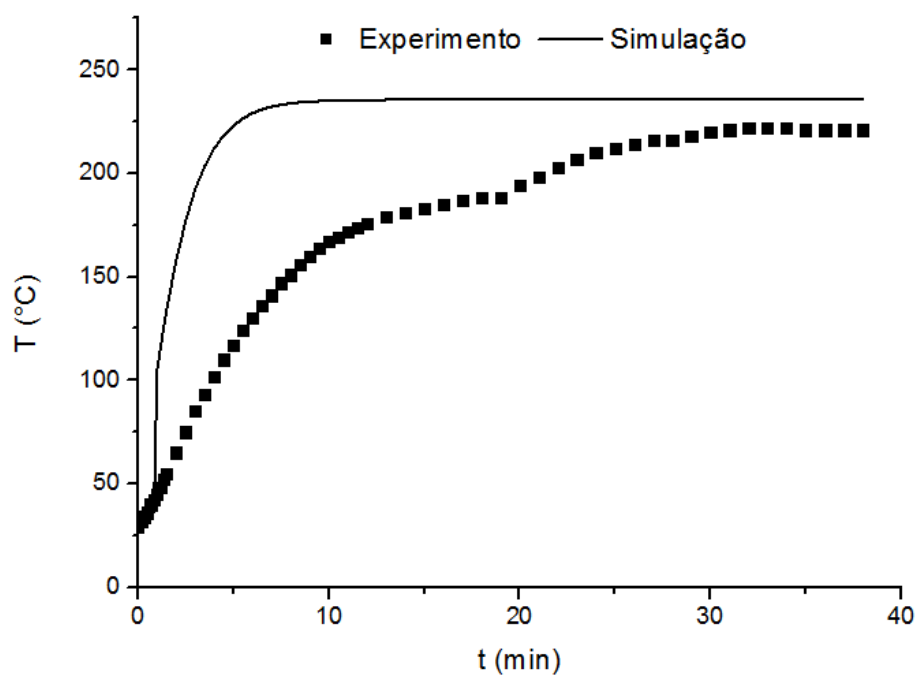


Figura 4.14 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o absorvedor menor de Alumínio com radiação de  $860 \text{ W.m}^{-2}$  e área de refração de  $0,09 \text{ m}^2$ .

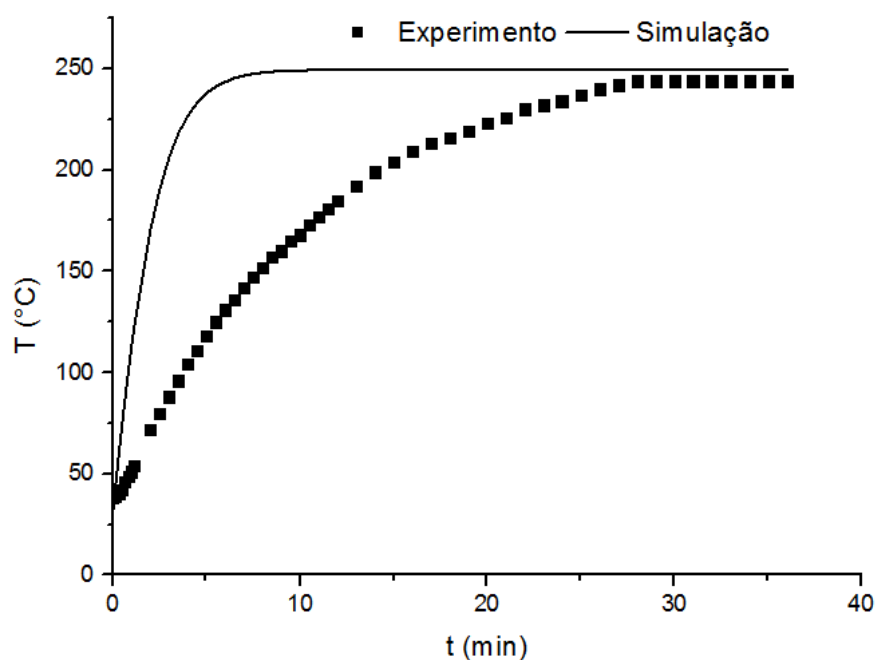


Figura 4.15 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o absorvedor maior de Alumínio com radiação de  $906 \text{ W.m}^{-2}$  e área de refração de  $0,09 \text{ m}^2$ .

Ainda comparando os absorvedores de alumínio, percebe-se pelas curvas da dinâmica de aquecimento expostas nas Figuras 4.14 e 4.15 que o corpo de prova maior obteve uma maior temperatura de equilíbrio nas condições do experimento realizado quando comparado ao corpo de prova menor, o que não era esperado. Essa diferença pode ser justificada pelas condições climáticas dos dias em que os ensaios experimentais foram realizados, visto que o experimento envolvendo o corpo de prova maior ocorreu em dias de maior radiação solar (maior potência de aquecimento) e maior temperatura ambiente (minimização dos efeitos convectivos), influenciando na temperatura alcançada no equilíbrio térmico do absorvedor.

Nota-se que a temperatura de equilíbrio fornecida pelas simulações numéricas foi bem prevista quando comparadas com os resultados obtidos experimentalmente para ambos os absorvedores de alumínio. Os desvios entre o valor experimental e o simulado para temperatura de equilíbrio foram de 6,33% e 2,05% para os corpos de prova menor (2,20 g) e maior (3,49 g), respectivamente.

Por outro lado, apesar das curvas da dinâmica simulado e experimental terem comportamentos semelhantes, com boa previsibilidade das temperaturas de equilíbrio, o tempo de aquecimento em ambos os experimentos foi diferente do previsto pela simulação numérica. Acredita-se que, por mais condutor que seja um corpo de prova de alumínio, a condução do calor do topo até o centro geométrico do cilindro, onde estava inserido o termopar, ainda enfrenta uma resistência térmica condutiva significativa ( $0,498 \text{ K.W}^{-1}$  para o corpo de prova menor e  $0,777 \text{ K.W}^{-1}$  para o corpo de prova maior). O reflexo imediato dessa resistência térmica seria a diferença de temperatura entre as duas posições do sistema (topo e meio do cilindro). Logo, até que a distribuição térmica fosse uniforme em todo cilindro, houve a necessidade de um maior tempo que aquele previsto pelas simulações.

Da mesma forma, as Figuras 4.16 e 4.17 apresentam uma comparação dos dados provenientes da simulação e dos resultados obtidos experimentalmente para o corpo de prova de cobre.

Para o absorvedor menor de cobre (3,49 g), o experimento teve duração de 30 min, com variação térmica de  $28^{\circ}\text{C}$  a  $215^{\circ}\text{C}$  em 22 min de experimento, apesar de aos 13 min começar a entrar no estado estacionário. A radiação média durante neste teste foi de  $900 \text{ W.m}^{-2}$ .

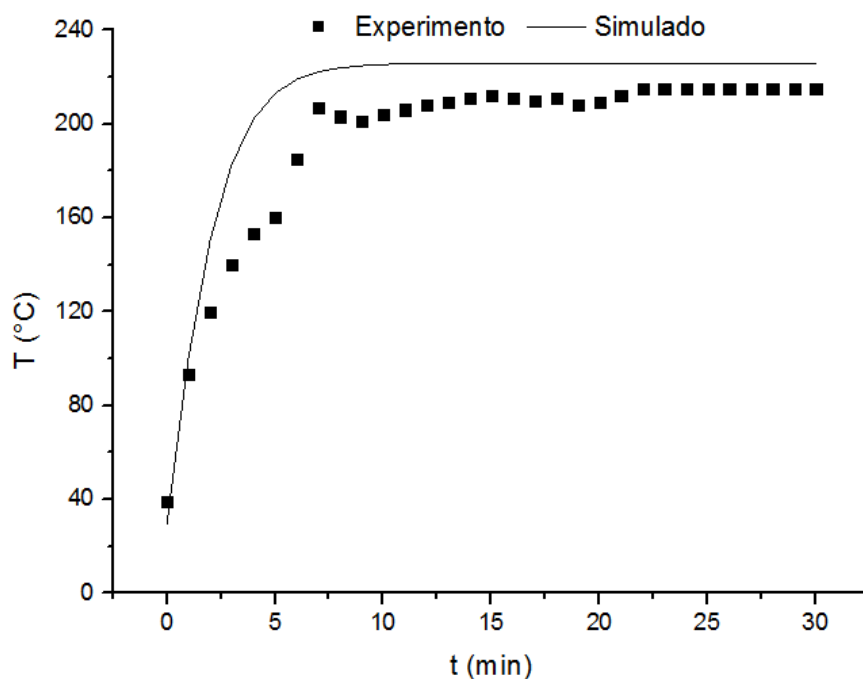


Figura 4.16 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o menor absorvedor de cobre com radiação de  $900 \text{ W.m}^{-2}$  e área de refração de  $0,09 \text{ m}^2$ .

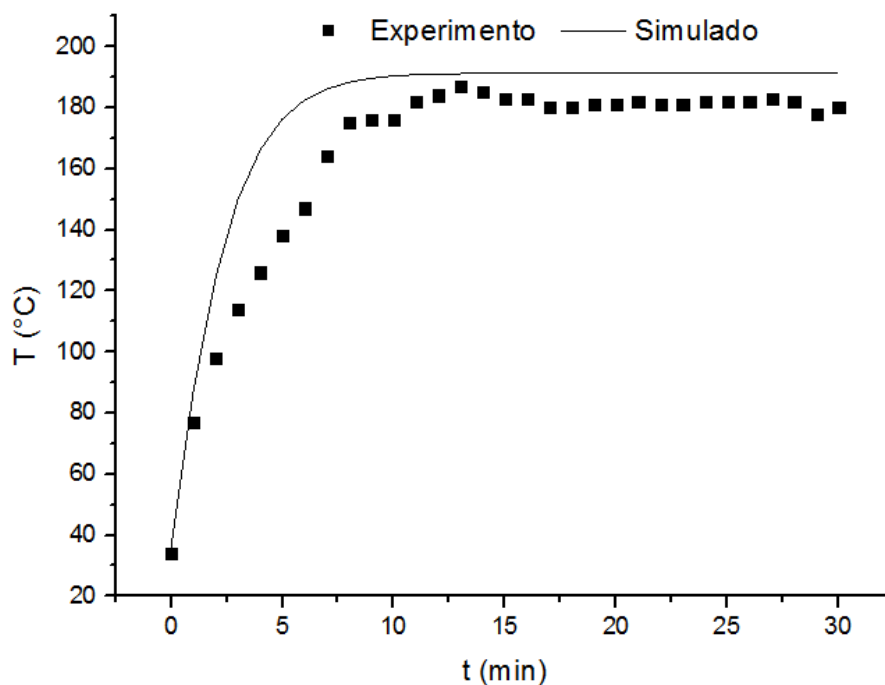


Figura 4.17 – Dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel utilizando o maior absorvedor de cobre com radiação de  $900 \text{ W.m}^{-2}$  e área de refração de  $0,09 \text{ m}^2$ .

Igualmente, o absorvedor maior de cobre (5,80 g), teve a duração do experimento em 30 min, com variação térmica de 28°C a 180°C, atingindo a temperatura de equilíbrio já por volta de 11 min. A radiação solar média deste experimento foi de 900 W.m<sup>-2</sup>.

Para a realização dos experimentos com o cobre tentou-se fazer os experimentos em dias com radiações similares, a fim de evitar possíveis interferências no comportamento de ambos absorvedores devido a condições climáticas. Assim, como pode ser visto nos gráficos apresentados os corpos de prova de cobre tiveram comportamentos similares aos da simulação, tendo o menor absorvedor alcançado maior temperatura de equilíbrio, enquanto que o maior obteve menor temperatura de equilíbrio, como era esperado.

Além disso, pode-se observar que as temperaturas de equilíbrio e os tempos de aquecimento fornecidos pelas simulações numéricas foram previstos satisfatoriamente. Para o cobre, os desvios entre o valor experimental e o simulado para temperatura de equilíbrio foram de 4,65% e 6,11% para os corpos de prova menor (3,49 g) e maior (5,80 g), respectivamente.

Em se tratando dos corpos de provas de cobre, os desvios observados entre os valores experimental e simulado foram substancialmente menores que os observados para os corpos de prova de alumínio. Acredita-se que no caso do cobre, a resistência térmica condutiva entre o topo e o centro do cilindro (0,120 K.W<sup>-1</sup> para o corpo de prova menor e 0,208 K.W<sup>-1</sup> para o corpo de prova maior) não gerou gradientes térmicos significativos ao longo da posição axial. Neste caso, a resistência térmica condutiva do cobre foi aproximadamente 4 vezes maior que a do alumínio.

#### *4.3.2 Escolha do Reator de Calcinação e Testes Exploratórios*

Dentre os materiais testados para ser o reator de calcinação, um fator predominante foi o fato de ser um material preto fosco e leve, além do diâmetro externo ser suficiente para cobrir o foco gerado pela lente de Fresnel.

Neste sentido, o cadinho de porcelana da Chiarotti, apesar de promissor devido ao diâmetro e a massa, a sua cor branca acarretou em grande dissipação de energia por reflexão durante os experimentos, prejudicando em alguns momentos a estabilidade das temperaturas. Além disso, o material sofreu quebras e fissuras

durante os experimentos, provavelmente devido ao choque térmico exacerbado ao qual o material foi submetido.

Descartado o cadinho de porcelana, testou-se o recipiente de ferro fundido, que apesar da cor preto fosco e do diâmetro adequados, foi um material que apresentou uma massa muito grande, prejudicando os experimentos. Assim, o cadinho de carbeto de silício destacou-se como o melhor material para a realização dos testes de decomposição térmica do carbonato de cálcio, sendo, portanto, escolhido como reator de calcinação, como apresentado na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Reator de calcinação escolhido: carbeto de silício.

Vale ressaltar que os testes para a escolha do reator foram realizados na lente de Fresnel de área de  $1\text{m}^2$ , uma vez que os experimentos de decomposição térmica também seriam realizados na mesma.

Além da escolha do reator, também foram realizados experimentos preliminares de calcinação, a fim de verificar que temperaturas eram alcançadas e que massas poderiam ser utilizadas nos testes finais. Nesta etapa foram realizados seis experimentos, variando a carga mássica de carbonato de cálcio e o tempo de exposição solar, a fim de verificar se havia reação química e se temperaturas acima de  $600^\circ\text{C}$  eram atingidas. Utilizou-se a lente de Fresnel com área de  $1\text{ m}^2$  e o reator de porcelana para a realização dos experimentos. Os resultados obtidos estão expressos na Tabela 4.4.

Resumindo que, os tempos de 6, 10, 12, 15 e 20 min, bem como as massas de 1, 3 e 5 g foram escolhidas com base na matriz de planejamento (Tabela 3.1), implementada anteriormente.

Tabela 4.4 Ensaios experimentais preliminares ( $A = 1\text{m}^2$ ).

Teste	$M_{\text{CaCO}_3}$ (g)	$G$ ( $\text{W.m}^{-2}$ )	$t_{\text{rampa}}$ (s)	$t$ (min)	$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$M_{\text{final}}$ (g)	Conversão (%)
1	1,00	935	51	6	680	0,90	22,73%
2	1,00	946	20	12	600	0,90	22,73%
3	5,00	894	198	10	720	4,56	20,00%
4	3,00	875	46	10	802	2,68	24,05%
5	1,00	903	10	20	800	0,59	92,57%
6	1,00	901	68	15	725	0,87	28,77%

Com base na Tabela 4.4, constatou-se que as temperaturas requeridas foram alcançadas e acima de  $600^{\circ}\text{C}$  foi possível verificar a variação de massa devido a decomposição do carbonato de cálcio em cal e gás carbônico. Durante os ensaios, a rampa de aquecimento foi cronometrada em segundos, e foi determinada como o tempo necessário para que fosse atingida a temperatura mínima de  $600^{\circ}\text{C}$  no experimento.

Analizando os experimentos 1, 2, 5 e 6, que apresentam a mesma massa de carbonato de cálcio e radiação solar próximas, percebe-se que a variação de massa é influenciada, principalmente, pelo tempo de exposição solar, como pode ser visualizado na Figura 4.19.

Comparando os experimentos 5 e 6, percebeu-se que o tempo de exposição solar foi fundamental e influenciou fortemente a decomposição do carbonato de cálcio, levando a conversão da massa de 1 g de 28,77% em um tempo de exposição de 15 min, para 92,57% em um tempo de 20 min. Além disso, a predominância da temperatura em  $800^{\circ}\text{C}$  influenciou para que esse resultado ocorresse. Segundo Reis *et al.* (2010), a calcinação foi fortemente influenciada pela temperatura, podendo o carbonato de cálcio alcançar 100% de conversão após temperaturas de  $800^{\circ}\text{C}$  em ambientes controlados, com remoção do  $\text{CO}_2$  formado.

Para os experimentos 3 e 4, notou-se que apesar de terem sido realizados com o mesmo tempo de exposição solar (10 min) e sob condições de radiação solar próximas, de 894 e  $875\text{ W.m}^{-2}$ , respectivamente, a variação na carga mássica de 3 g para 5 g influenciou tanto na rampa de aquecimento quanto na Temperatura do experimento. Percebe-se que a rampa de aquecimento subiu de 46 s com massa de 3 g para 198 s quando a massa foi de 5 g. Esse comportamento pode ser justificado

pelo aumento da massa de  $\text{CaCO}_3$  no reator, que exige maior energia para o aquecimento.

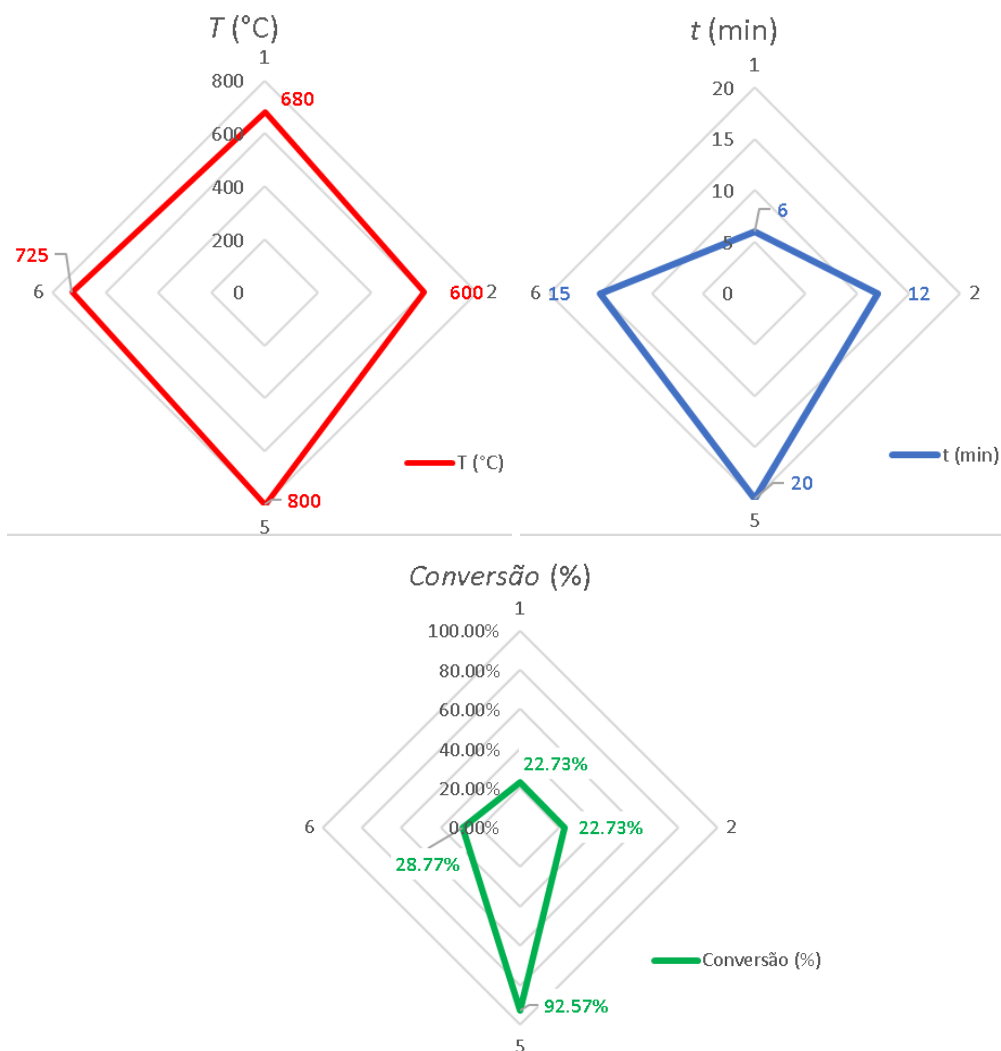


Figura 4.19 – Comparação dos testes 1, 2, 5 e 6 fixando a massa em 1g e variando o tempo de exposição solar.

#### 4.3.3 Decomposição do carbonato de Cálcio

Apesar dos ensaios preliminares terem sido realizados tendo cadinhos de porcelana como reator, foi observado que havia muita dissipação de energia, especialmente pelo fenômeno de reflexão. Portanto, o cadinho de carbeto de silício foi utilizado como o reator de calcinação na realização dos experimentos de decomposição do carbonato de cálcio.



Além disso, optou-se por utilizar áreas reduzidas da lente de Fresnel, a fim de demonstrar que não seria necessário utilizar a área total de 1 m<sup>2</sup>. Para tal, foram utilizadas como base as melhores áreas obtidas na previsão teórica citada anteriormente: 0,42 m<sup>2</sup> e 0,79 m<sup>2</sup>.

Os valores de carga mássica foram mantidos em 1, 3 e 5 g, além da massa do cadinho de carvão de silício de 91,6 g, sendo, na verdade, 92,6 g, 94,6 g e 96,6 g. O tempo de exposição solar foi fixado em 30 min para todos os experimentos, após a rampa de aquecimento. Portanto, a maior parte da energia é utilizada basicamente para o aquecimento do reator.

Barbosa (2014) verificou que a temperatura de calcinação ótima e o tempo de residência no reator (tempo de exposição solar, no caso deste trabalho) foram, respectivamente, de 850°C e 35 min, determinados para a calcinação do resíduo de calcário.

Na Tabela 4.5 são apresentados os ensaios realizados para a decomposição do carbonato de cálcio, bem como as conversões e temperaturas alcançadas. Vale ressaltar que as conversões do carbonato de cálcio em cal (CaO), foram calculadas com base na estequiometria da reação de decomposição, a qual fornece que para uma conversão total há a perda de 44% de massa em forma de CO<sub>2</sub>.

Tabela 4.5 – Ensaios experimentais para decomposição térmica do carbonato para um tempo de exposição solar de 30 min.

Teste	$A [X_1] \text{ (m}^2\text{)}$	$M_{\text{CaCO}_3}[X_2] \text{ (g)}$	$G \text{ (W.m}^{-2}\text{)}$	$GA.M^{-1} \text{ (W.kg}^{-1}\text{)}$	$t_{\text{rampa}} \text{ (s)}$	$T(^{\circ}\text{C})$	$M_{\text{final}} \text{ (g)}$	Conversão (%)
1	0,42 (-1)	1,00 (-1)	980	4443,96	52	630	0,64	81,82%
2	0,42 (-1)	3,00 (0)	860	3817,37	71	650	2,32	51,52%
3	0,42 (-1)	5,00 (+1)	970	4216,52	30	700	4,31	31,36%
4	0,79 (+1)	1,00 (-1)	975	8316,23	19	750	0,65	79,55%
5	0,79 (+1)	3,00 (0)	946	7898,33	49	880	2,16	63,64%
6	0,79 (+1)	5,00 (+1)	938	7693,31	97	700	4,05	43,18%

Pode-se perceber que o aumento da área de 0,42 m<sup>2</sup> para 0,79 m<sup>2</sup> teve pouca influência nas respostas obtidas para conversão, da mesma forma que as temperaturas alcançadas. É notável que as maiores conversões foram obtidas para

as menores massas de carbonato, enquanto que a menor conversão, abaixo de 50% (experimentos 3 e 6) foi obtida para a maior carga mássica (5 g).

Esse fato pode ser justificado, pois as massas menores apresentam melhor superfície de contato, facilitando a transferência de calor e massa no reator, enquanto que, ao se trabalhar com uma maior massa de carbonato, o material fica mais compactada dentro do reator, dificultando a transferência de calor e massa.

Com o intuito de se verificar estatisticamente os resultados obtidos experimentalmente, foram analisados os efeitos das variáveis carga mássica e área da lente de Fresnel na conversão do carbonato de cálcio, no qual a primeira variável foi observada em três níveis (1, 3 e 5g) e a segunda variável em dois níveis (0,42 e 0,79m<sup>2</sup>), compondo um planejamento fatorial 3x2.

A Tabela 4.6 apresenta os efeitos das variáveis lineares e quadráticas sobre a resposta. Para um nível de significância de 5% e eliminando os fatores que não apresentavam efeitos sobre a resposta, obteve-se a Tabela 4.7 com um  $R^2$  de 0,9269, na qual fica confirmado que a variável  $X_2$  é o fator que influencia predominantemente na conversão do carbonato de cálcio, apesar de ser possível observar uma pequena variação na conversão quando fixadas as massas, para áreas diferentes.

Tabela 4.6 – Efeito das variáveis Área [ $X_1$ ] e Carga Mássica [ $X_2$ ] sobre a conversão da decomposição do carbonato de cálcio ( $R^2=0,9912$ ).

Fator	Parâmetro	Desvio	Nível de Significância
<b>Média</b>	<b>0,585117</b>	<b>0,017312</b>	<b>0,018831</b>
$x_1$	0,072233	0,034625	0,284561
$x_2$	<b>-0,434150</b>	<b>0,042406</b>	<b>0,061986</b>
$x_2^2$	-0,013975	0,036725	0,768518
$x_1x_2$	0,070450	0,042406	0,344947

Tabela 4.7 – Efeito da variável Massa [ $X_2$ ] sobre a conversão da decomposição do carbonato de cálcio ( $R^2=0,9269$ ).

Fator	Parâmetro	Desvio	Nível de Significância
Média	0,585117	0,024873	0,000019
$x_2$	-0,434150	0,060927	0,002050

A Figura 4.20 apresenta a superfície de resposta obtida para a conversão do carbonato de cálcio em função das variáveis estudadas.

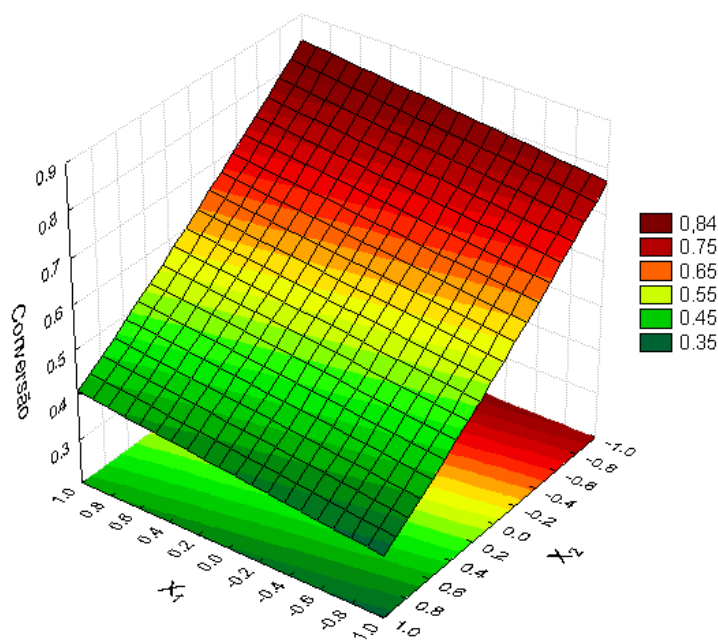


Figura 4.20 – Superfície de resposta para a conversão do carbonato de cálcio em função da carga mássica e da área da lente de Fresnel.

Além disso, as conversões de até 81,82% observadas são justificadas pela dificuldade de se manter o ambiente experimental controlado, uma vez que os ensaios foram altamente dependentes de condições climáticas favoráveis, tais como radiação solar, presença de nuvens e velocidade do vento.

Através dos resultados apresentados neste capítulo, observa-se a viabilidade de aproveitar a energia solar para a decomposição térmica do carbonato de cálcio. Verifica-se também que as temperaturas necessárias foram alcançadas utilizando o concentrador solar de Lentes de Fresnel. Além disso, o tempo de exposição solar dos experimentos foi suficiente para se observar a conversão do carbonato de cálcio.

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

---

Considerando que o objetivo principal deste trabalho era avaliar a viabilidade da decomposição térmica do carbonato de cálcio para a produção de cal utilizando como fonte térmica a energia solar concentrada por Lentes de Fresnel, este capítulo apresenta suas principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

A dinâmica de aquecimento da lente de Fresnel foi proposta numericamente e experimentalmente, a fim de determinar a rampa de aquecimento e a temperatura de equilíbrio alcançada para dois tipos de absorvedores: cobre e alumínio. Os dados fornecidos na simulação foram verificados experimentalmente, sendo considerados representativos para a temperatura de equilíbrio atingida.

A partir dos ensaios experimentais, verificou-se possível alcançar temperaturas acima de 600°C, a qual era necessária para a decomposição térmica do carbonato de cálcio utilizando um concentrador de Lente de Fresnel com áreas propostas de 0,42 m<sup>2</sup> e 0,79 m<sup>2</sup>. Concluiu-se que o aumento da área de 0,42 m<sup>2</sup> para 0,79 m<sup>2</sup> não teve influência significativa sobre a degradação do carbonato.

As análises de TG e DTG forneceram resultados que possibilitaram compreender o comportamento da decomposição térmica do carbonato de cálcio. Estudada a uma taxa de 15°C.min<sup>-1</sup>, foi possível observar que a degradação ocorria entre 600°C e 800°C.

Assim, foi possível registrar as perdas de massa e calcular a conversão por meio da estequiometria da reação de decomposição térmica. Entretanto, notou-se que maiores massas apresentam menores conversões devido a dificuldades de transferência de massa e calor dentro do reator. Dessa forma, concluiu-se que para as massas estudadas (91,6 g do reator mais a massa de carbonato de 1, 3 ou 5 g) a concentração solar por lentes de Fresnel mostrou-se suficiente para realizar a decomposição térmica do carbonato de cálcio.

Portanto, apesar dos percalços, pode-se perceber que é viável e possível obter a conversão de carbonato de cálcio em óxido de cálcio e com uma otimização da unidade e do ambiente experimental será possível obter melhores conversões.

Diante disso, pode-se elaborar aqui algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilização de um reator menos profundo, no qual as massas maiores não sejam prejudicadas pela ausência de superfície de contato;
- Acoplar à unidade experimental um suporte fixo para o reator de calcinação, de forma que o mesmo acompanhe o foco da lente de Fresnel;
- Estudar o efeito da granulometria sobre a decomposição térmica do carbonato de cálcio utilizando a energia solar como fonte energética;
- Aproveitamento do carbonato de cálcio presente em resíduos, como a casca de ovo, para a decomposição térmica na unidade de lente de Fresnel;
- Realização de análises químicas, por exemplo, Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV, Difração de Raios – X – DRX e Fluorescência de Raios – X – FRX, para a determinação da composição do produto proveniente da calcinação do carbonato no concentrador solar.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALVES, T. M. E.; SANTOS, A. M. M.; BRASILEIRO, M. I.; PINHEIRO, S. F. L.; PRADO, A. C. A. **Produção de hidróxido de cálcio a partir de resíduo da pedra Cariri.** Universidade Federal do Cariri – UFCA. 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal – RN, 2016.

ANDRADE, L.A. **Aproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar.** 110f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

ANDRADE, L.A.; BARROZO, M.A.S.; VIEIRA, L.G.M. A study on dynamic heating in solar dish concentrators. **Renewable Energy**, 87, p. 501-508, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.055>

ANEEL. **Energia Solar.** 2000. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia\\_solar/energia\\_solar.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/energia_solar/energia_solar.htm). Acesso em: maio, 2018.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 2ª Ed. São José dos Campos, 2017.

BARBOSA, R.C. **Estudo do aproveitamento de resíduos de mineração rico em calcário para a produção de cal e captura de dióxido de carbono.** 80 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. 2014. <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1419-19388-150779>

BAUER, T. *et al.* Material aspects of solar salt for sensible heat storage. **Applied Energy**, v. 111, p. 1114 – 1119, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.072>

BIANCHINI, H.M. **Avaliação comparativa de sistemas de energia solar térmica.** Escola Politécnica – UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.

BOREAL SOLAR. **Vantagens de instalar painéis solares fotovoltaicos em sua casa**. 2016. Disponível em: <http://borealsolar.com.br/blog/2016/10/06/7-vantagens-de-instalar-paineis-solares-fotovoltaicos-em-sua-casa/>. Acesso em: maio 2018.

CETESB. **Estudo de baixo Carbono para a Indústria de Cal no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo, 2017.

CHEN, C. J. **Physics of Solar Energy**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781118172841>

CHEN, H.; LIU, N. Application of non-arrhenius equations in interpreting calcium carbonate decomposition kinetics: revisted. **J. Am. Ceram. Soc.**, 93, p. 548–553, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03421.x>

CORATHERS, L. A. Lime. **Mineral commodity summaries**. In: U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Reston, VA: USGS, 2016. p. 98–99. Disponível em: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/mcs-2016-lime.pdf> Acesso em: abril 2018.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. CASTRO, P. **Radiação Solar**. Universidade Federal de Lavras Departamento de Engenharia Núcleo de Agrometeorologia e Climatologia, 2013.

DOLLIMORE, D.; TONG, P.; ALEXANDER, K. S. The kinetic interpretation of the decomposition of calcium carbonate by use of relationships other than the Arrhenius equation. **Thermochimica Acta**. v. 282/283, p.13-27, 1996. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02810-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02810-2)

FREAS, R.C.; HAYDEN, J.S.; PRYOR JR., C.A. Limestone and Dolomite in Industrial Minerals and Rocks. 7ªEd. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. 2006.

GARG, H. P.; PRAKASH, J. **Solar Energy Fundamentals and Applications**. Delphi: McGraw Hill, 2000.

GEORGE, P.A.O.; GUTIÉRREZ, A.S.; MARTÍNEZ, J.B.C; VANDECASTEELE, C. Cleaner production in a small lime factor by means of process control. **Journal of Cleaner Production**, 18, p. 1171-1176, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.019>

GMM. **Sinterización utilizando haces de alta energia**. 2018. Disponível em: [http://materiales.etsii.uclm.es/?page\\_id=1261](http://materiales.etsii.uclm.es/?page_id=1261). Acesso em: maio, 2018.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal – Fundamentos e aplicações na Engenharia Civil**. Associação Brasileira de Cal (ABPC), 1ª Edição, São Paulo, 1998.

JACOB, P. **Estudo do rendimento térmico de um aquecedor solar parabólico redondo para viabilidade de uso comercial e residencial**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

JOHN, V.M.; PUNHAGUI, K.G.; CINCOTTO, M.A. **Economia de baixo carbono: Avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas**. 76p. Ribeirão Preto – SP, Dezembro, 2014.

KABIR, E.; KUMAR, P.; KUMAR, S.; ADELODUN, A.A.; KIM, K.H. Solar energy: Potential and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, p. 894 – 900, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.094>

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering**. Burlington, MA: Academic Press, 2009

LARA, F.; VELÁZQUEZ, N.; SAUCEDA, D.; ACUÑA, A. Metodología para el Dimensionamiento y Optimización de um Concentrador Lineal Fresnel. **Información tecnológica**, v.24, p.115-128, 2013. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000100013>

LIMA, C.S. **O efeito da calcinação na qualidade do produto final do processo de produção da cal**. Tecnologia em Mineração. Universidade Federal do Pampa, 2016.



LIN, M.; SUMATHY, K.; DAI, Y.; ZHAO, X. Performance investigation on a linear Fresnel lens solar collector using cavity receiver. **Solar Energy**, v. 107, n. 0, p. 50 – 62, 2014 <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.026>

LIRA, T.S. *et al.* The Use of Nonlinearity Measures in the Estimation of Kinetic Parameters of Sugarcane Bagasse Pyrolysis. **Chem. Eng. Technol.** 33, No. 10, 1699–1705, 2010. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000137>

MA, X.; ZHENG, H.; CHEN, Z. An investigation on a compound cylindrical solar concentrator (CCSC). **Applied Thermal Engineering**, 120, p. 719 – 727, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.030>

MIJATOVIC M, DIMITROVSKI D, VESELINOVIC V. Fresnel lens-absorber system with uniform concentration and normal incoming rays to the absorber. **Journal of Optics** (Paris), 18, 1987.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. 2017.

PALANDRI, A.; GILOT, P.; PRADO, G. A kinetic study of the decarbonation of  $\text{CaCO}_3$ . **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 27. Pag 119 – 130, 1993. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(93\)80003-I](https://doi.org/10.1016/0165-2370(93)80003-I)

PEREIRA, L.S. **A Indústria da Cal no Brasil**. CETEM. 2009. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/500/1/27Luana%20dos%20Santos%20Pereira.pdf>. Acesso em: Março, 2018.

PRADO, G.O. **Concepção e avaliação de concentradores solares do tipo disco e lente de Fresnel para dessalinização de água**. 90f. Tese de doutorado em engenharia química, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

PRADO, G.O.; ULHO, T.F.; DAMASCENO, J.J.R; VIEIRA, L.G.M. **Estado da arte em tecnologias de captação da energia solar para fins térmicos**. XX Congresso

Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), Florianópolis – SC, 2014.  
<https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1252-20243-183986>

PRADO, R. T. A. et al. **Levantamento do estado da arte: Energia Solar**. Projeto Finep 2386/04. São Paulo. 2007

REIS, H.M.; MACEDO, J.C.F; SILVA, R.J. **Análise da cinética química da reação de calcinação da lama de cal gerada no ciclo de recuperação química na indústria de extração de celulose pelo processo Kraft**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ, 18. Foz do Iguaçu, 2010.

RIBAS, V. E. **Estudo da utilização de concentradores solares para o processo de gaseificação de biomassa – concepção de um reator químico solar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2016.

SAMPAIO, J.A.; ALMEIDA, S.L.M. **Calcário e Dolomito**. Capítulo 15, In: Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações. Ed. Adão Benvindo da Luz e Fernando A. Freitas Lins. Rio de Janeiro, p. 327 – 373, 2005.

SANSANIWAL, S.K.; SHARMA, V.; MATHUR, J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: a comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 82, p. 1576 – 1601, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.003>

SANTOS, K.G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo**. 235 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SILVA, A.C. **Estudo e otimização da reação de hidratação do hidróxido de cálcio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOARES, B D. **Estudo da produção de óxido de cálcio por calcinação do calcário: caracterização dos sólidos, decomposição térmica e otimização paramétrica.** Dissertação de mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

SOUTO, E.C.S. **Estudo de condições operacionais para obtenção de carbonato de cálcio precipitado.** 84f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

TOMÁS, M.R. **Cal e Calcário.** Instituto de Tecnologia do Paraná. Dossiê Técnico. 2007.

TSURADA, L.K.; MENDES, T.A.; VITOR, L.R.; SILVEIRA, M.B. A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável e social. 6º International Workshop Advances in **Cleaner Production**, São Paulo, 2017.

WU, G.; ZHENG, H.; MA, X.; KUTLU, C.; SU, Y. Experimental investigation of a multi-stage humidificationdehumidification desalination system heated directly by a cylindrical Fresnel lens solar concentrator. **Energy conversion and management**, 143, p. 241 – 251, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.011>

XIE, W.T.; DAI, Y.J.; WANG, R.Z.; SUMATHY, K. Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, p. 2588 – 2606, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.031>

## APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados obtidos de temperatura de equilíbrio e tempo de aquecimento para o alumínio, o cobre e o carbonato de cálcio a partir da implementação da Matriz de Planejamento.

$N$	$GA.M^{-1}$ (WKg <sup>-1</sup> )	$T_{EAL}$ (K)	$t_{aAL}$ (min)	$T_{ECu}$ (K)	$t_{aCu}$ (min)	$T_{ECaCO_3}$ (K)	$t_{aCaCO_3}$ (min)
1	12500	383,7	13,2	515,1	27,5	726,6	17,2
2	27500	448,1	11,6	637,9	20,4	905,3	11,0
3	42500	497,3	10,3	720,2	16,5	1019,2	8,4
4	4167	335,4	13,0	401,9	32,8	533,8	27,7
5	9167	366,0	13,4	476,4	29,8	665,5	20,1
6	14167	392,0	13,0	532,3	26,4	752,7	16,0
7	2500	323,5	12,0	369,7	32,3	467,5	31,6
8	5500	344,2	13,2	424,4	32,2	576,2	25,1
9	8500	362,3	13,4	467,8	30,2	651,4	20,8
10	105000	632,2	7,0	924,0	9,9	1295,7	4,7
11	231000	784,8	4,5	1141,1	6,0	1589,2	2,8
12	357000	883,2	3,4	1279,2	4,6	1776,4	2,1
13	35000	474,1	10,9	682,2	18,2	967,0	9,5
14	77000	581,0	8,1	849,0	11,8	1194,3	5,8
15	119000	654,2	6,5	955,9	9,1	1338,7	4,4
16	21000	422,7	12,3	592,0	22,9	840,3	12,9
17	46200	507,9	10,0	737,1	15,7	1042,4	8,0
18	71400	569,3	8,4	831,6	12,4	1170,7	6,1
19	197500	751,8	4,9	1094,7	6,7	1526,4	3,1
20	434500	931,1	3,0	1346,3	4,0	1867,5	1,8
21	671500	1045,5	2,3	1506,5	3,0	2085,4	1,3
22	65833	557,1	8,7	813,2	13,0	1145,8	6,4
23	144833	690,5	5,9	1007,8	8,1	1408,9	3,8
24	223833	778,0	4,6	1131,6	6,2	1576,4	2,9
25	39500	488,3	10,5	705,7	17,1	999,2	8,8
26	86900	600,3	7,7	877,6	11,0	1233,0	5,3
27	134300	676,3	6,1	987,6	8,5	1381,5	4,0