

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA



**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR PARA PRODUÇÃO DE
CAL**

Larissa Peixoto Ribeiro Souza

UBERLÂNDIA-MG

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM CONCENTRADOR SOLAR PARA PRODUÇÃO DE
CAL**

Larissa Peixoto Ribeiro Souza

**Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários para a
aprovação na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso do curso de Engenharia
Química.**

UBERLÂNDIA-MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE LARISSA PEIXOTO RIBEIRO SOUZA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 14/12/2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador- FEQUI/UFU

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
FEQUI/UFU

Suélen Mara Gonçalves
Doutoranda PPGEQ/UFU

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pelo apoio e incentivo durante os cinco anos de graduação.

A minha irmã pelo carinho, paciência e força que me dá nos momentos mais importantes.

Ao meu esposo pelo estímulo e incansável compreensão.

Aos meus colegas de curso pela força e amizade.

Aos meus professores pela colaboração na minha formação.

Ao professor orientador Luiz Gustavo Martins Vieira e à mestranda Bruna Sene Alves Araújo que tanto colaboraram com este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 A CASCA DO OVO	3
2.2 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DA CASCA DO OVO.....	4
2.3 A CAL E O SEU PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	5
2.4 ENERGIA SOLAR/CONCENTRADORES SOLARES	8
3 METODOLOGIA.....	10
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	10
3.1.1 Preparação das cascas do ovo.....	10
3.1.2 Porcentagem mássica da casca nos ovos	10
3.1.3 Granulometria.....	10
3.1.4 Densidade	11
3.1.5 Determinação do Percentual de Carbonato de Cálcio	11
3.2 PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA	15
4.1.1 Porcentagem mássica da casca nos ovos	15
4.1.2 Granulometria.....	16
4.1.3 Densidade	17
4.1.4 Determinação do Percentual de Carbonato de Cálcio	18
4.2 PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR	19
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	23

5.1 CONCLUSÕES	23
5.2 SUGESTÕES	23
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Aspectos morfológicos das partículas da amostra resíduos da casca de ovo. Fonte: (Guedes F. H., 2014).....	5
Figura 2.2- Consumo de cal no Brasil por setor. Fonte: Associação Brasileira de Produtores de cal. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).....	6
Figura 2.3- Processo de extração mineral do calcário e etapas de seleção granulométrica. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).....	7
Figura 2.4- Processo de decomposição térmica do calcário para produção da cal virgem. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).....	8
Figura 2.5- Processo de Produção de cal hidratada e transporte para o mercado consumidor. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).....	8
Figura 3.1 – Esquema de um corpo de prova submetido à radiação solar concentrada por uma Lente de Fresnel.....	12
Figura 4.1- Tratamento estatístico da porcentagem mássica da casca nos ovos.....	16
Figura 4.2- Modelo de distribuição granulométrica GGS das cascas de ovos moídas.....	17
Figura 4.3- Temperatura de equilíbrio obtida para cada linha da matriz de planejamento.....	20
Figura 4.4- Tempo de aquecimento obtido para cada linha da matriz de planejamento.....	21
Figura 4.5- Ajuste do modelo para temperatura de equilíbrio em função das variáveis resposta.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Composição química da casca do ovo Fonte: (Guedes F. H., 2014).....	4
Tabela 2.2- Análise térmica da casca de ovo. Fonte: (Guedes F. H. 2014).....	4
Tabela 2.3- Produção de cal pelos principais produtores mundiais. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).....	6
Tabela 3.1 – Matriz de planejamento.....	13
Tabela 4.1- Porcentagem mássica da casca nos ovos.....	15
Tabela 4.2- Ensaio de granulometria para as cascas de ovos moídas.....	16
Tabela 4.3- Tratamento estatístico da densidade das cascas.....	17
Tabela 4.4- Resultados dos testes de volumetria do carbonato de cálcio.....	18
Tabela 4.5- Resultados dos testes de volumetria das cascas de ovos moídas.....	18
Tabela 4.6- Resultados obtidos de tempo de aquecimento e de temperatura de equilíbrio.....	19

LISTA DE SÍMBOLOS

a	área de seção reta do corpo de prova (m ²)
A	área da Lente Fresnel (m ²)
cp_s	calor específico do corpo de prova [J/(kg K)]
$F_{s\infty}$	fator de forma do corpo em relação ao meio ambiente (-)
G	fluxo de radiação solar (W/m ²)
h	coeficiente convectivo de transferência de calor [W/(m ² °C)]
H	altura do corpo de prova (m)
M	massa do corpo de prova (kg)
N	numeração das linhas da matriz de planejamento (-)
t	tempo (s)
t_A	tempo de aquecimento (min)
T	temperatura (°C)
T_E	temperatura de equilíbrio a ser atingida pelo corpo de prova (°C)
T_∞	temperatura ambiente do fluido (°C)
ε_s	emissividade da superfície do corpo de prova (-)
ρ	densidade do corpo de prova (kg/m ³)
ρ_s	refletividade do corpo de prova (-)
τ	transmissividade da lente de Fresnel (-)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [5,670 .E-8 W/(m ² K ⁴)]

RESUMO

A cal (óxido de cal) é um produto químico muito utilizado em diversos setores industriais, tais como siderúrgico, metalúrgico, sanitário, entre outros. Os carbonatos são as principais matérias-primas para produção deste insumo químico mediante o respectivo aquecimento para promover a decomposição térmica em dióxido de carbono e cal. Grande parte dos custos de produção de cal está relacionada com a energia térmica gasta (elétrica ou combustíveis fósseis) para promover o aquecimento dos fornos em algumas centenas de graus centígrados. Assim, este trabalho de conclusão de curso visa promover este aquecimento utilizando a luz solar (energia renovável, limpa e abundante) mediante a respectiva concentração em lentes do tipo Fresnel.

Palavras-chave: cal, carbonatos, luz solar, lentes do tipo Fresnel.

ABSTRACT

Lime (lime) is a chemical widely used in many industrial sectors, such as steel, metallurgical, sanitary, among others. Carbonates are the main raw materials for the production of this chemical by heating it to promote thermal decomposition in carbon dioxide and lime. Much of the cost of producing lime is related to spent thermal energy (electric or fossil fuels) to promote furnace heating by a few hundred degrees Celsius. Thus, this work of course completion aims to promote this heating using sunlight (renewable, clean and abundant energy) by concentrating on Fresnel type lenses.

Key words: lime, carbonates, sunlight, Fresnel type lenses.

1. INTRODUÇÃO

Os ovos são amplamente utilizados na indústria, devido ao seu alto consumo no mundo todo, por ser um alimento acessível à maioria da população. Segundo Oliveira et al. (2009), a produção mundial atual é de 59,2 milhões de toneladas por ano, gerando um número expressivo de cascas, consideradas como resíduos. Sabe-se que a casca representa 10% do peso do ovo, o que então corresponde a cerca de 5,92 milhões de toneladas de resíduos gerados por ano em todo o mundo (Oliveira et al., 2009).

Esse número de cascas de ovos geradas e descartadas no meio ambiente, sem a devida preocupação com a problemática ambiental, poderiam ser reaproveitadas considerando tanto aspectos econômicos quanto aspectos ambientais em sua valorização. As cascas de ovos, além de conter um teor considerável de proteínas, podem ser utilizadas para produção de novos produtos (Guedes, 2014).

Tem-se ampliado cada vez mais a busca por novas fontes de carbonato de cálcio (CaCO_3), obtido principalmente da rocha calcária, uma fonte não renovável que está cada vez mais escassa. Essa escassez faz com que o processo de obtenção seja cada vez mais caro, e impulsiona a busca por meios que não tragam dano à natureza e que sejam de fácil acesso à população, ao meio acadêmico e a indústria. Nesse contexto, as cascas de ovo podem ser utilizadas como fonte alternativa para obtenção de carbonato de cálcio (Rodrigues & Ávila, 2017).

O processo para produção de cal conhecido como calcinação se dá a partir do calcário. A matéria prima é extraída, selecionada, moída e posteriormente submetida a elevadas temperaturas entre 800°C e 900°C, dentro de fornos industriais. O resultado desse processo é a formação do óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal. (Barbosa, 2014).

A cal ou óxido de cal (CaO) tem uma produção e um consumo expressivo no mercado, já que possui diversas aplicações nos segmentos industriais, tais como: produção de cimento, cerâmica, pinturas a base de CaO , aditivos para asfalto, também é usada no processo de branqueamento do papel, como estabilizante químico para o solo (correção de pH), no tratamento de águas prevenindo corrosão das tubulações e outras aplicabilidades. (Rodrigues & Ávila, 2017).

Os principais impactos ambientais relacionados à produção da cal são às emissões de dióxido de carbono (gás de efeito estufa) e de outros gases, alto consumo de energia, a produção de resíduos, a mudança na paisagem devido à mineração, emissão de ruídos e

poeiras. Além disso, para a produção de cal é necessário elevadas temperaturas, o que encarece o processo. Sendo assim, o uso de energia solar é uma alternativa ambientalmente e economicamente viável a ser utilizada. (Rodrigues & Ávila, 2017).

Sabe-se que a luz solar é uma fonte energética barata, limpa e abundante. O Brasil, em particular, por ostentar uma elevada taxa de incidência de raios solares, apresenta todas as condições necessárias para o aproveitamento desse potencial térmico. Além disso, sua utilização é de baixo impacto ambiental e culmina em processos não poluentes. Apesar de todas essas vantagens, a energia solar ainda é pouco utilizada, pois para seu aproveitamento são necessárias técnicas de concentração solar. (Prado et al., 2015).

Umas das técnicas de concentração solar é o uso de lentes de Fresnel. Este tipo de lente foi inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel, para o uso de faróis. Elas são lentes planas compostas por anéis circulares concêntricos sucessivos em sua superfície. A qualidade da imagem produzida pelas lentes de Fresnel pode ser pior em comparação com uma lente convencional. No entanto, elas são bastantes úteis devido ao seu reduzido peso e espessura, tornando a luz transmitida menos atenuada (Garcia, 2013).

Desta forma, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo desenvolver um concentrador solar para produção de cal, utilizando a luz solar (energia renovável, limpa e abundante) mediante a respectiva concentração em lentes do tipo Fresnel. Sendo que os objetivos específicos são:

- Caracterizar as cascas dos ovos, após moagem (Moinho de Facas), quanto à granulometria (Difração a *Laser*), à densidade (Picnometria a gás Hélio) e à determinação analítica de carbonato de cálcio presente nas amostras (Testes de Volumetria).
- Projetar um concentrador solar para produção de cal, a partir de fundamentos de Fenômenos de Transporte e Termodinâmica, de modo a prever a relação entre as principais variáveis operacionais (tamanho do reator, carga mássica, gradientes térmicos, tempo de exposição à luz solar, intensidade da radiação solar, entre outros).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A CASCA DO OVO

O consumo de ovos é altamente expressivo em todo o mundo, e isso se deve principalmente por ser um alimento nutritivo, de preparação rápida e fácil e por ter um custo relativamente baixo, sendo assim acessível à maioria da população (Guedes, 2014). Estudos realizados por Oliveira et al. (2009) mostraram que a produção mundial de ovos é de cerca de 59,2 milhões de toneladas por ano.

O alto consumo de ovos traz como consequência a expressiva geração de resíduos, já que muitas vezes as cascas são simplesmente descartadas no meio ambiente sem nenhuma preocupação e valorização (Guedes, 2014). Segundo Oliveira et al. (2009), a casca pesa 10 % do peso total do ovo, sendo assim são gerados aproximadamente 5,92 milhões de toneladas de resíduos por ano em todo o mundo.

Com relação ao Brasil, estudos feitos por Freire et al. (2006), mostraram que são geradas aproximadamente 120.000 toneladas por ano de casca de ovo, um número bastante expressivo. Com quase 36% da produção nacional, o estado de São Paulo foi considerado o maior produtor de ovos em 2011 (Guedes, 2014).

Essa grande quantidade de cascas de ovo que são geradas e descartadas no meio ambiente, sem a devida preocupação com os problemas ambientais que são causados, poderiam ser reaproveitadas, levando em consideração tanto aspectos econômicos quanto aspectos ambientais em sua valorização. Aspectos que devem ser considerados são que a casca do ovo contém um teor considerável de proteínas, sais minerais e pode ser usada como fonte alternativa de CaCO_3 (carbonato de cálcio), sendo este matéria prima para produção de cal. A principal fonte de obtenção do carbonato de cálcio é a rocha calcária, uma fonte natural não renovável (Guedes, 2014).

Considerando esses argumentos, percebe-se que o reaproveitamento das cascas de ovos pode diminuir o impacto sobre as reservas naturais de rocha calcária, e também diminuir o problema da poluição gerada pelo descarte feito de forma inadequada no meio ambiente (Guedes, 2014). Segundo estudo feito por Freire & Holanda (2006), o reaproveitamento traria como vantagem a redução do volume de lixo gerado e como consequência reduziria a necessidade de locais para sua disposição final, como os lixões e aterros sanitários que são muito utilizados no Brasil.

2.2 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DA CASCA DO OVO

Guedes (2014) apresenta uma tabela de composição química da casca do ovo, fazendo uma comparação entre diferentes autores.

Tabela 2.1- Composição química da casca do ovo. Fonte: (Guedes, 2014).

Autor	carbonato de cálcio	Carbonato de magnésio	Fosfato de cálcio	substâncias orgânicas
Neves, 1998	96%	1%	1%	—
Brostow et al, 1999	94%	1%	1%	4%
Freire et al., 2008	95%	—	—	5%

A casca de ovo é predominantemente constituída de carbonato de cálcio (CaCO_3), como mostra a tabela 2.1. O carbonato de cálcio (CaCO_3) é fonte para obtenção de óxido de cálcio. A decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) em temperaturas elevadas, entre 800 °C a 900 °C, produz óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2), segundo a reação a seguir: (Guedes, 2014).



Outro estudo apresentado por Guedes (2014) é análise térmica da casca do ovo mostrado na Tabela 2.2, onde nota-se que a casca de ovo teve uma perda de massa equivalente a 46,6 %, que é referente ao CO_2 e matéria orgânica liberados na decomposição do CaCO_3 .

Tabela 2.2- Análise térmica da casca de ovo. Fonte: (Guedes, 2014).

Evento Térmico	DTA (°C)	Perda de massa TG (%)
Endotérmico	51,0	1,2
Exotérmico	324,0	5,2
Endotérmico	765,3	40,2

Guedes (2014) apresentou também através de um microscópio eletrônico de varredura os aspectos morfológicos das partículas da amostra de resíduos da casca de ovo. É possível observar, de acordo com a Figura 2.1 o formato irregular das partículas de casca de ovo, resultado do processo de trituração usado.

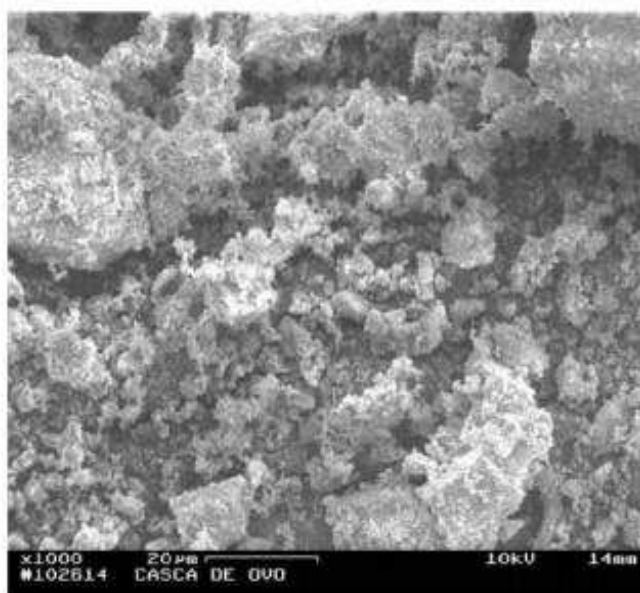


Figura 2.1- Aspectos morfológicos das partículas da amostra resíduos da casca de ovo. Fonte: (Guedes, 2014).

Sendo assim, os estudos realizados por Guedes (2014), ressaltaram a importância do reaproveitamento da casca do ovo, que além diminuir os problemas ambientais devido ao resíduo gerado. A casca do ovo é também uma importante fonte de carbonato de cálcio que por decomposição em altas temperaturas obtêm-se óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal, um importante produto químico amplamente utilizado em diversos setores industriais.

2.3 A CAL E SEU PROCESSO DE PRODUÇÃO

O calcário é uma rocha sedimentar precipitada por agentes químicos e orgânicos e constituída principalmente por carbonato de cálcio (CaCO_3). Sua decomposição térmica, processo conhecido como calcinação, produz o óxido de cálcio (CaO), também conhecido como cal virgem. A cal virgem quando hidratada produz a cal hidratada ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), um sólido branco, pouco solúvel em água, que pode estar seco ou, mais comumente, encontrar-se em suspensão na presença de água livre (Barbosa, 2014).

Segundo Barbosa (2014), a análise de fatores como: temperatura, granulometria, tipo de cal, impurezas, agitação e o tempo de reação, são aspectos importantes na produção da cal virgem e influenciam em sua reatividade e capacidade de hidratação.

A cal virgem por se tratar de um produto versátil tem alto consumo no mercado, sendo utilizada em diferentes segmentos industriais, como é mostrado na Figura 2.2. Algumas

aplicações são: na produção de aço, alumínio, cobre, níquel, zinco, na estabilização de solos, na produção de papel e celulose, alimentos, dentre outras finalidades (Barbosa, 2014).

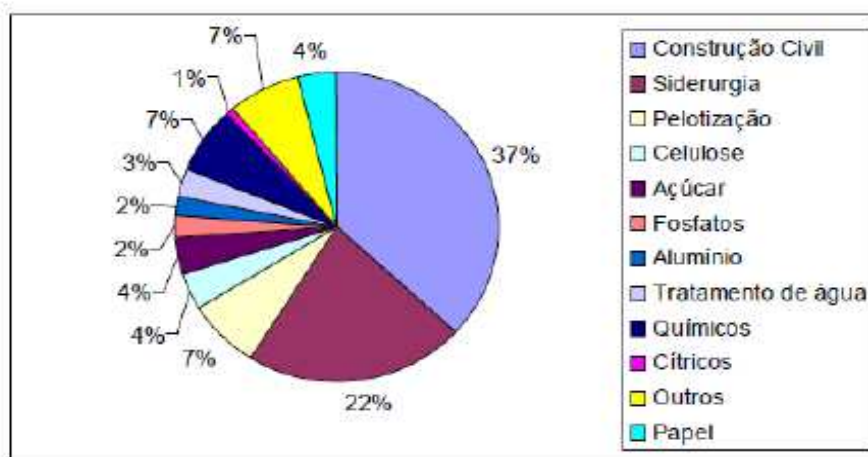


Figura 2.2- Consumo de cal no Brasil por setor. Fonte: (Barbosa R. C., 2014).

A tabela 2.3 apresenta a quantidade de cal produzida nos anos de 2008 e 2009 pelos principais países produtores. O Brasil ocupa a 5ª posição mundial e, em 2008, produziu mais de 7 milhões de toneladas de cal. A líder de produção de cal é a China com 60,7% de participação no mercado seguida pelos Estados Unidos com 5,7%. (Barbosa, 2014). Dados que evidenciam que a cal é um produto consumido em grande escala em todo o mundo.

Tabela 2.3- Produção de cal pelos principais produtores mundiais. Fonte: (Barbosa, 2014).

Discriminação	Produção 1000(t)		
	2008	2009	%
China	180000	190000	67,0%
Estados Unidos da América	19900	15000	5,3%
Japão (somente cal virgem)	9500	8000	2,8%
Rússia	8200	7000	2,5%
Brasil	7425	6645	2,3%
Alemanha	7000	5000	1,8%
Itália	6000	5000	1,8%
México	6500	5000	1,8%
França	4000	3000	1,1%
Turquia (comercializado)	3600	3000	1,1%
Irã	2700	2200	0,8%
Vietnã	2200	2000	0,7%
Bélgica	2200	1800	0,6%

Reino Unido	2000	1800	0,6%
Áustria	2000	1700	0,6%
Polônia	1900	1600	0,6%
Canadá	2070	1500	0,5%
África do Sul (comercializado)	1590	1300	0,5%
Outros países	27200	22000	7,8%

O processo conhecido como descarbonatação ou calcinação do carbonato de cálcio produz a cal virgem, seguindo a reação endotérmica e reversível apresentada na Equação 1.2 (Barbosa, 2014).



Segundo Barbosa (2014), as etapas de produção industrial da cal virgem começam com a extração da matéria-prima e o seu transporte e vão até os britadores para beneficiamento. Nesta etapa a cal segue para os moinhos, onde passa pelo processo de moagem e assim adquire uma granulometria mais uniforme. Depois disso, a próxima etapa é a de peneiramento, onde o calcário passa por uma seleção granulométrica. Depois, uma etapa de lavagem pode ser incluída para a retirada de impurezas do calcário. A Figura 2.3 mostra o esquema do processo de extração do calcário e as etapas de classificação por tamanho.

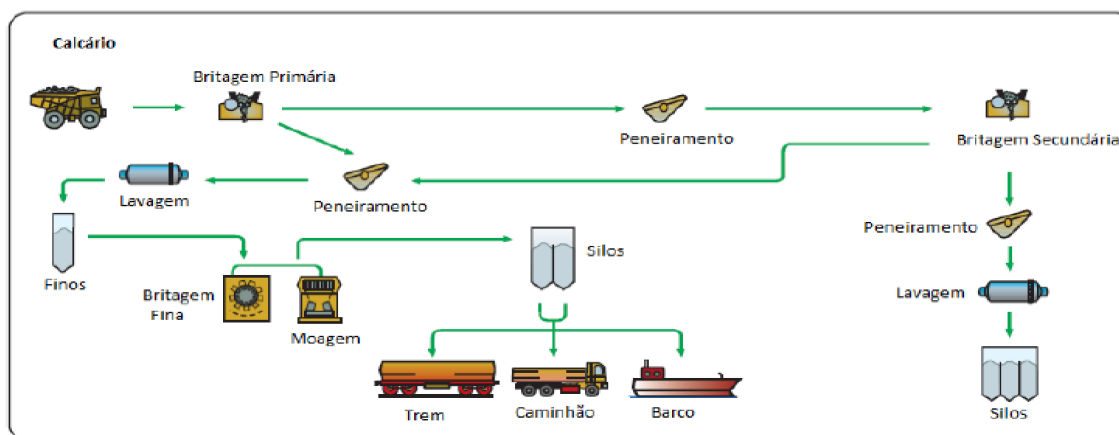


Figura 2.3- Processo de extração mineral do calcário e etapas de seleção granulométrica.

Fonte: (Barbosa, 2014).

A próxima etapa consiste no processo de calcinação. Nesse processo, as pedras maiores seguem para o topo de fornos verticais, as pequenas são alimentadas em um forno rotatório disposto na horizontal e os mais finos transportados para um pulverizador onde se

fabrica o calcário moído. A Figura 2.4 mostra o esquema do processo de calcinação do calcário, que produz a cal virgem.

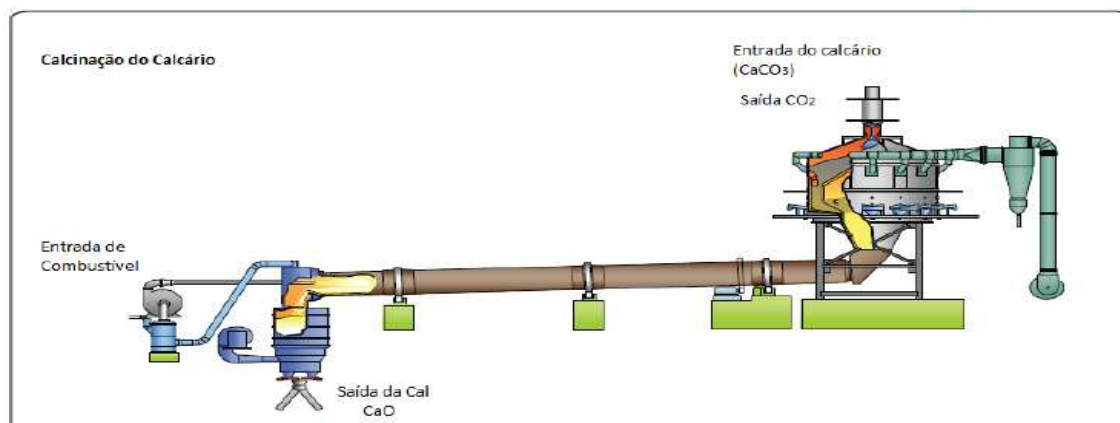


Figura 2.4- Processo de decomposição térmica do calcário para produção da cal virgem.

Fonte: (Barbosa, 2014).

Depois disso, a cal virgem produzida pode ser embalada ou pode seguir para um hidratador onde se combina com água para produzir hidróxido de cálcio para produção da cal hidratada, conforme esquema mostrado na Figura 2.5.

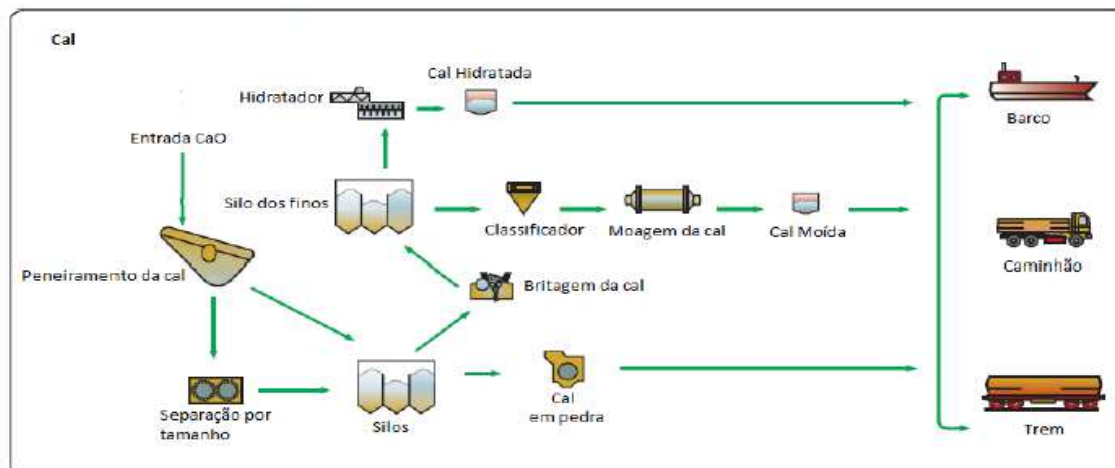


Figura 2.5- Processo de produção de cal hidratada e transporte para o mercado consumidor.

Fonte: (Barbosa, 2014).

2.4 ENERGIA SOLAR/ CONCENTRADORES SOLARES

Energia solar é a energia obtida do sol, chegando à superfície da Terra como ondas eletromagnéticas (fótons), seja de maneira direta ou difusa. A luz solar tem como grande vantagem ser uma fonte energética barata, limpa e abundante. Tendo em vista, todas essas vantagens são de grande importância que ela seja utilizada para minimização de problemas

ambientais gerados por outras fontes energéticas. Nesse contexto, o grande desafio no campo da engenharia é converter a radiação solar em energia utilizável em locais e horários necessários. (Andrade, 2014).

O Brasil, em particular por ostentar uma elevada taxa de incidência de raios solares, apresenta todas as condições necessárias para o aproveitamento desse potencial térmico. Além disso, sua utilização é de baixo impacto ambiental e culmina em processos não poluentes. Apesar de todas essas vantagens, a energia solar ainda é pouco utilizada, pois para seu aproveitamento são necessárias técnicas de concentração solar. (Prado et al., 2015).

Os concentradores solares são superfícies que permitem a captação da energia solar que atinge o topo da estrutura mediante uma superfície espelhada que a reflete para uma região denominada de foco. A radiação solar é convertida em energia térmica nessa região focal. Os concentradores solares podem ser classificados de acordo com a característica do seu ponto focal (Andrade, 2014).

Umas das técnicas de concentração solar é o uso de lentes de Fresnel. Este tipo de lente foi inventada pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel, para o uso de faróis. Elas são lentes planas compostas por anéis circulares concêntricos sucessivos em sua superfície. A qualidade da imagem produzida pelas lentes de Fresnel pode ser pior em comparação com uma lente convencional. No entanto, elas são bastantes úteis devido ao seu reduzido peso e espessura, tornando a luz transmitida menos atenuada (Garcia, 2013).

3 METODOLOGIA

Nesta seção estão descritos os procedimentos utilizados para caracterização da matéria prima as cascas dos ovos. Após moagem, as mesmas foram caracterizadas quanto à distribuição do tamanho de partículas, aferida à densidade e à determinada a quantidade de carbonato de cálcio presente nas amostras.

É apresentado o projeto de um concentrador solar através do acoplamento de uma lente de Fresnel a um reator para a decomposição de carbonato de cálcio em cal. Além do procedimento usado para calcular as respostas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

3.1.1 Preparação das cascas do ovo

Primeiramente, foi realizada a preparação da matéria prima. Os ovos utilizados para essa caracterização foram adquiridos em supermercado, em cartelas de 20 unidades. As cascas foram obtidas de cerca de 160 ovos. Os ovos foram lavados e separados em casca, gema e clara. Após a separação, as cascas foram bem lavadas, trituradas e secas em estufa por 24h a 55°C. Após o processo de estufa, as cascas passaram por uma moagem, com o intuito de reduzir as cascas trituradas em granulometrias menores e uniformes. Para a moagem foi utilizado um Moinho de Facas. Posteriormente, as cascas moídas passaram por um processo de seleção granulométrica via peneiramento, conforme apresentado nas seções seguintes.

3.1.2 Porcentagem mássica da casca nos ovos

A determinação da porcentagem mássica da casca presente nos ovos consiste de um procedimento simples. Primeiramente o ovo inteiro é pesado e o béquer separadamente. Depois separou casca, clara e gema e usando uma balança pesou-se a massa de casca no béquer e descontou-se o peso do béquer para a determinação da massa de casca. Tendo a massa de casca e a massa do ovo inteiro determinou-se a porcentagem de casca presente nos ovos.

3.1.3 Granulometria

Para determinar a distribuição de tamanho de partículas da amostra, inicialmente recorreu-se a um ensaio de granulometria pelo método de difração a laser, através do equipamento Malvern Mastersizer 2000 localizado no Laboratório de Sistemas Particulados

da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Este teste consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem a amostra e na aplicação de leis estatísticas aos valores medidos.

Como os resultados obtidos não foram conclusivos, optou-se por realizar uma seleção granulométrica das cascas moídas utilizando o peneiramento via peneiras vibratórias.

Assim, foram realizadas 4 bateladas utilizando peneiras de #16, #32, #48 e #80. Dessa forma, as cascas moídas foram selecionadas em 5 granulometrias distintas, incluindo o fundo do peneiramento.

3.1.4 Densidade

A determinação da densidade média das cascas em diferentes tamanhos de amostra foi feito por picnometria a gás Hélio, no equipamento Accupyc 1330 Micromeritics. Através desta técnica, a densidade real de materiais sólidos é obtida utilizando-se o princípio de Arquimedes de deslocamento de fluídos, neste caso do gás Hélio.

3.1.5 Determinação do percentual de carbonato de cálcio

A determinação da massa de carbonato de cálcio presente nas amostras foi feita por testes de volumetria. As amostras utilizadas foram carbonato de cálcio (branco) e as cascas de ovos moídas.

A análise volumétrica consiste em titular a amostra com ácido clorídrico em excesso para garantir que todo carbonato seja consumido, conforme reação 3.1 a seguir:



A quantidade de HCl não reagido foi titulado com solução de NaOH, sendo neutralizado, conforme seguinte reação química:



Dessa forma é possível saber qual a massa de HCl que efetivamente reagiu para decompor o carbonato de cálcio. Assim, foi possível determinar a massa de carbonato de cálcio presente na amostra, representada por:

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{100}{72} m_{\text{HCl}}$$

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{100}{72} 36(M_{\text{HCl}} V_{\text{HCl}} - M_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}})$$

$$m_{\text{CaCO}_3} = 50(M_{\text{HCl}} V_{\text{HCl}} - M_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}}) \quad (3.3)$$

3.2 PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR

Na FEQUI – UFU existe uma unidade experimental construída de acordo com o esquema da figura 3.1 para concentração solar utilizando lentes do tipo Fresnel.

Tem-se que a lente do Tipo Fresnel de área “A” e transmissividade “ τ ” está exposta a um fluxo de radiação solar “G”. O ponto focal desta lente incide sobre o topo de um corpo de prova cilíndrico de seção reta “a”, altura “H”, densidade “ ρ ”, refletividade “ ρ_s ”, emissividade “ ε_s ” e calor específico “ cp_s ”. A lateral e a base do corpo de prova estão totalmente isoladas. Entre a lente e o corpo de prova há ar “estagnado” à temperatura ambiente “ T_∞ ”. Esquematicamente:

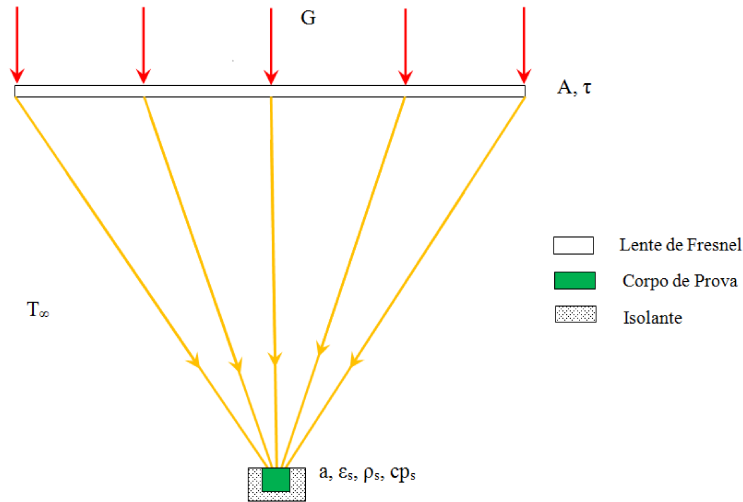


Figura 3.1 – Esquema de um corpo de prova submetido à radiação solar concentrada por uma Lente de Fresnel.

A partir de um Balanço de Energia no Corpo de Prova, pode-se propor o seguinte equacionamento:

$$aH\rho c p_s \frac{dT}{dt} = GA\tau - \rho_s GA\tau - F_{S\infty} a\varepsilon_s \sigma (T^4 - T_\infty^4) - ha(T - T_\infty) \quad (3.4)$$

Considerando que:

- O meio ambiente recebe a maior parte da radiação emitida ou refletida pelo corpo de prova, então, aproxima-se $F_{s\infty} = 1$ (fator de forma do corpo em relação ao meio ambiente).
- As condições da *Lei de Kirchhoff* estão presentes, então absortividade (α_s) é igual a emissividade (ε_s).
- O somatório das propriedades radiativas do corpo de prova [refletividade (ρ_s), absortividade (α_s) e transmissividade (τ_s)] é igual a 1 e o corpo de prova é opaco, então $\rho_s = 1 - \alpha_s$.

Reorganizando a equação anterior, 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 $T(0) = T_\infty$:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{H_{pcp_s}} \left[(1 - \varepsilon_s) \tau G \frac{A}{a} - \varepsilon_s \sigma (T^4 - T_\infty^4) - h(T - T_\infty) \right] \quad T(0) = T_\infty \quad (3.5)$$

No estado estacionário, o corpo de prova atinge o equilíbrio térmico, cuja temperatura de equilíbrio (T_E) pode ser calculada pela Equação 3.6:

$$\varepsilon_s \sigma (T_E^4 - T_\infty^4) - h(T_E - T_\infty) - (1 - \varepsilon_s) \tau G \frac{A}{a} = 0 \quad (3.6)$$

Foram feitas simulações numéricas para prever o Tempo de Aquecimento (t_A) para que determinado corpo de prova atingisse a Temperatura de Equilíbrio (T_E). Para isso, foram utilizados os mesmos fatores e faixa operacional de Andrade et al. (2014) sob a forma de uma Matriz de Planejamento, de acordo com a Tabela 3.1. Os fatores utilizados foram a área da lente de Fresnel (A), a massa do corpo de prova (M) e o fluxo de radiação solar incidente (G).

Tabela 3.1 – Matriz de planejamento.

N	A (m ²)	M (kg)	G (W/m ²)
1	0,05	0,001	250
2	0,05	0,001	550
3	0,05	0,001	850
4	0,05	0,003	250
5	0,05	0,003	550
6	0,05	0,003	850
7	0,05	0,005	250
8	0,05	0,005	550

9	0,05	0,005	850
10	0,42	0,001	250
11	0,42	0,001	550
12	0,42	0,001	850
13	0,42	0,003	250
14	0,42	0,003	550
15	0,42	0,003	850
16	0,42	0,005	250
17	0,42	0,005	550
18	0,42	0,005	850
19	0,79	0,001	250
20	0,79	0,001	550
21	0,79	0,001	850
22	0,79	0,003	250
23	0,79	0,003	550
24	0,79	0,003	850
25	0,79	0,005	250
26	0,79	0,005	550
27	0,79	0,005	850

Dessa forma, foi utilizado o Software Excel para a resolução dos balanços de energia apresentados, obtendo como resultado a Temperatura de Equilíbrio (TE) e o Tempo de Aquecimento (ta). Os dados foram tratados no Software Statistica para a obtenção de um modelo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados observados nas análises de caracterização das cascas dos ovos, e os alcançados pelas simulações numéricas do projeto de um concentrador solar que acopla uma lente Fresnel a um reator para a decomposição das cascas em cal.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

4.1.1 Porcentagem mássica da casca nos ovos.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos no procedimento experimental realizado para a obtenção da porcentagem mássica da casca nos ovos.

Tabela 4.1- Porcentagem mássica da casca nos ovos.

Massa do ovo inteiro	Massa do béquer	Massa do béquer + massa da casca	Massa da casca	% Casca
63,3202	52,3996	60,1588	7,7592	12,25
61,0827	52,4025	59,9199	7,5174	12,31
62,6518	52,4346	58,6308	6,1962	9,89
62,7322	52,4077	60,2445	7,8368	12,49
63,7051	52,4102	60,0222	7,6120	11,95
63,7414	52,4506	59,4223	6,9717	10,94
66,5826	52,6255	58,0024	5,3769	8,08
64,6374	52,4059	59,7287	7,3228	11,33
65,7036	52,4023	59,9493	7,5470	11,49
68,3842	52,4050	59,9692	7,5642	11,06
63,4969	52,4060	59,3587	6,9527	10,95
62,3253	52,4037	60,0909	7,6872	12,33
60,9581	52,4107	60,3519	7,9412	13,03
63,2854	52,4950	60,1661	7,6711	12,12
63,4595	52,4867	60,2822	7,7955	12,28
65,4352	52,4544	59,5919	7,1375	10,91
62,9031	52,4255	60,2719	7,8464	12,47
66,6275	52,4122	59,7009	7,2887	10,94
63,0530	52,6580	60,0146	7,3566	11,67

A partir dos dados da tabela acima foi possível realizar o tratamento estatístico apresentando na forma de carta de controle da porcentagem mássica da casca nos ovos utilizados (Figura 4.1).

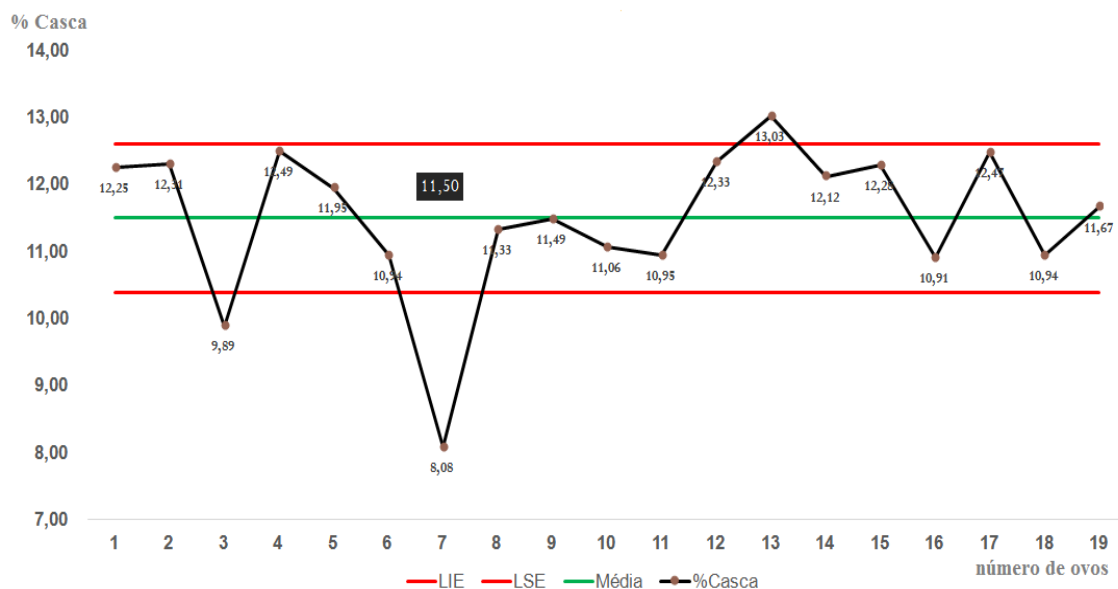


Figura 4.1- Tratamento estatístico da porcentagem mássica da casca nos ovos.

Observa-se pela Figura 4.1, que a porcentagem média de casca nos ovos encontrada foi de 11,5%. Esse valor é próximo ao encontrado na literatura, como relatado por Oliveira et al. (2009), que verificou que a casca pesa 10 % do peso total do ovo.

4.1.2 Granulometria

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para o ensaio de granulometria, via peneiramento utilizando peneiras vibratórias.

Tabela 4.2- Ensaio de granulometria para as cascas de ovos moídas.

Diâmetro da peneira (mm)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Massa Final – Massa Inicial (g)	Δx	%	X
1	411,31	415,22	3,91	0,01631	1,63093	0,98369
0,5	354,18	477,64	123,46	0,51497	51,49745	0,46872
0,3	360,18	436,77	76,59	0,31947	31,94711	0,14924
0,18	345,46	359,24	13,78	0,05748	5,74789	0,09177
< 0,18 (fundo)	354,95	376,95	22,00	0,09177	9,17661	0,00000
Total	1826,08	2065,82	239,74	1	100	1,69342

Feito isso, foi possível obter o modelo de distribuição granulométrica das cascas de ovos moídas, onde foi realizado o ajuste ao modelo Gates-Gaudin-Shaumann (GGS), conforme mostra a figura 4.2.

$$\text{Modelo GGS: } X = (D/k)^m \quad (4.1)$$

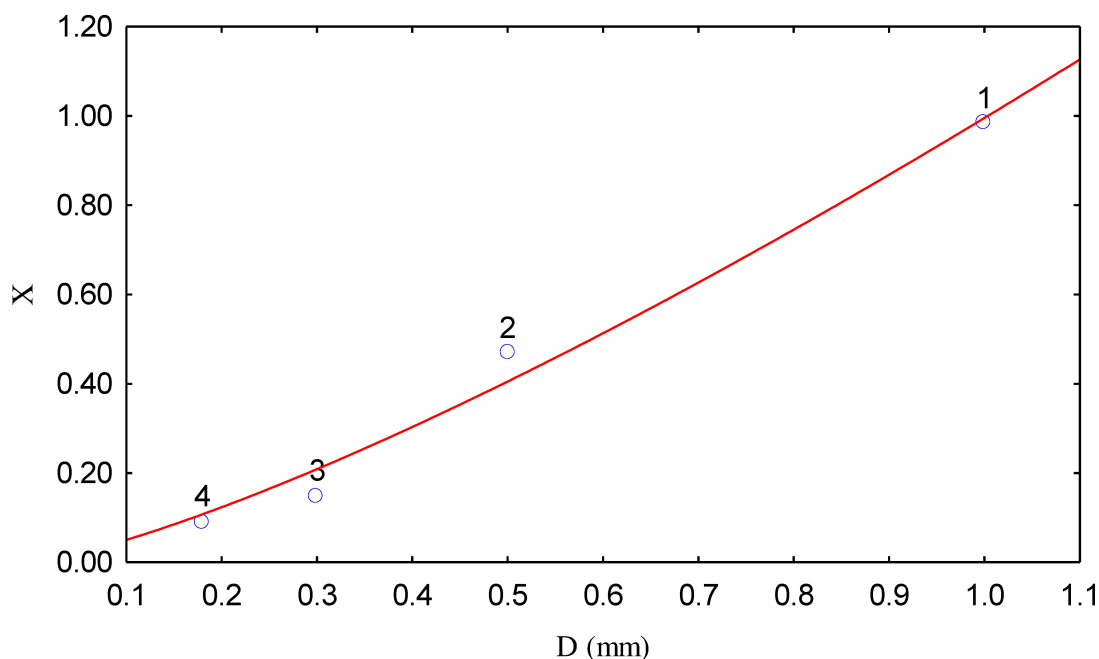


Figura 4.2- Modelo de distribuição granulométrica GGS das cascas de ovos moídas.

A partir do gráfico da Figura 4.2, obteve-se:

$$\text{Modelo: } X = (D/1,0035)^{1,2973} \quad (R^2=0,9919)$$

Pode-se perceber que o modelo GGS teve um bom ajuste, apresentando um coeficiente de correlação ao quadrado (R^2) de 0,9919. Foram encontrados os parâmetros k e m iguais a $1,0035 \pm 0,0488$ mm e $1,2973 \pm 0,1646$, respectivamente.

4.1.3 Densidade

A Tabela 4.3 mostra os resultados obtidos da densidade das cascas para amostras de diferentes tamanhos, com seus respectivos desvios nos valores encontrados, feito por picnometria a gás Hélio.

Tabela 4.3- Tratamento estatístico da densidade das cascas.

Amostra	Densidade (g/cm³)	Desvio
#16	2,4120	0,0022

#32	2,4259	0,0010
#48	2,4086	0,0005
#80	2,2986	0,0009
Fundo (<#80)	2,3914	0,0009

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4.3, foi calculada a densidade média para as cascas de ovo moídas que é de 2387,3 (kg/m³).

4.1.4 Determinação do Percentual de Carbonato de Cálcio

As Tabelas 4.4 e 4.5 mostram respectivamente os resultados obtidos dos testes experimentais de volumetria para as amostras de carbonato de cálcio e das cascas de ovos moídas.

Tabela 4.4- Resultados dos testes de volumetria do carbonato de cálcio.

Amostra	m inicial (g)	V HCL (L)	V NaOH (L)	mo (g)	Erro absoluto (%)
Fundo	1,0225	0,0250	0,0039	1,0550	3,1785
Fundo	1,0035	0,0250	0,0056	0,9700	3,3383
#32	1,0345	0,0250	0,0050	1,0000	3,3349
#32	1,0312	0,0250	0,0051	0,9950	3,5105

Tabela 4.5- Resultados dos testes de volumetria das cascas de ovos moídas.

Amostra	m inicial (g)	V HCL (L)	V NaOH (L)	mo (g)	Erro absoluto (%)
Fundo	1,0652	0,0250	0,0080	0,8500	15,1093
Fundo	1,0020	0,0250	0,0081	0,8450	10,2858
#32	1,0923	0,0250	0,0145	0,5250	48,8684
#32	1,0253	0,0250	0,0155	0,4750	50,7150

Através dos resultados obtidos das Tabelas 4.4 e 4.5 percebe-se que para a amostra de carbonato de cálcio foram obtidos bons resultados com erros relativamente pequenos. Já para a amostra das cascas de ovos moídas pode-se perceber que houve erros significativamente altos, explicados devido à composição da casca de ovo, que não apresenta somente o carbonato de cálcio, mas também outros minerais. Além disso, pode-se atribuir os desvios à erros

experimentais, ocasionados da amostragem indevida, pesagem, ponto de viragem, entre outros erros atribuídos ao analista.

4.2 PROJETO DO CONCENTRADOR SOLAR

Conforme a metodologia apresentada nesse trabalho foi possível construir a matriz de planejamento, onde foram obtidos através da Equação 3.6 o tempo de aquecimento (t_A) para que o corpo de prova atingisse a Temperatura de Equilíbrio (T_E), conforme é mostrado na Tabela 4.6.

Parâmetros utilizados para construção da matriz de planejamento:

- Constante de Stefan Boltzmann: $\sigma = 5,670E-8$ (W/m²K⁴)
- Área de seção reta do corpo de prova: $a = 0,0000785$ (m²)
- Altura do corpo de prova: $H = 0,01$ (m)
- Densidade do corpo de prova: $\rho = 2387,3$ (kg/m³)
- Calor específico do corpo de prova: $c_p = 795$ (J/kg K)
- Emissividade da superfície do corpo de prova: $\epsilon_s = 0,90$ (-)
- Refletividade do corpo de prova: $\rho_s = 0,10$ (-)
- Transmissividade da lente de Fresnel: $\tau = 0,74$ (-)

Tabela 4.6- Resultados obtidos de tempo de aquecimento e de temperatura de equilíbrio.

N	A (m ²)	M (kg)	G (W/m ²)	X1	X2	X3	tA (min)	TE (K)
1	0,05	0,001	250	-1	-1	-1	23,37	603,87
2	0,05	0,001	550	-1	-1	0	16,02	753,58
3	0,05	0,001	850	-1	-1	1	12,57	850,70
4	0,05	0,003	250	-1	0	-1	32,15	453,58
5	0,05	0,003	550	-1	0	0	26,32	554,39
6	0,05	0,003	850	-1	0	1	22,17	625,38
7	0,05	0,005	250	-1	1	-1	33,7	407,01
8	0,05	0,005	550	-1	1	0	30,48	484,96
9	0,05	0,005	850	-1	1	1	27	543,17
10	0,42	0,001	250	0	-1	-1	7,27	1087,59
11	0,42	0,001	550	0	-1	0	4,4	1338,72
12	0,42	0,001	850	0	-1	1	3,3	1498,55
13	0,42	0,003	250	0	0	-1	14,03	806,10
14	0,42	0,003	550	0	0	0	8,82	1000,70
15	0,42	0,003	850	0	0	1	6,72	1124,45
16	0,42	0,005	250	0	1	-1	18,42	698,59
17	0,42	0,005	550	0	1	0	11,97	870,52

18	0,42	0,005	850	0	1	1	9,23	980,47
19	0,79	0,001	250	1	-1	-1	4,87	1285,09
20	0,79	0,001	550	1	-1	0	2,9	1576,25
21	0,79	0,001	850	1	-1	1	2,15	1761,96
22	0,79	0,003	250	1	0	-1	9,7	959,11
23	0,79	0,003	550	1	0	0	5,93	1184,51
24	0,79	0,003	850	1	0	1	4,48	1327,77
25	0,79	0,005	250	1	1	-1	13,1	833,64
26	0,79	0,005	550	1	1	0	8,18	1033,84
27	0,79	0,005	850	1	1	1	6,23	1161,11

Observa-se pela Tabela 4.6, que é na linha 21 da matriz de planejamento que se obtêm a maior temperatura de equilíbrio num menor tempo de aquecimento. Isso se deve ao fato de que quanto maior a área da lente de Fresnel (A), menor a massa do corpo de prova (M) e maior o fluxo de radiação solar incidente (G), obtêm-se uma maior temperatura de equilíbrio num menor tempo de aquecimento.

O comportamento da temperatura de equilíbrio e do tempo de aquecimento, estão ilustrados nos gráficos das Figura 4.3 e 4.4, respectivamente.

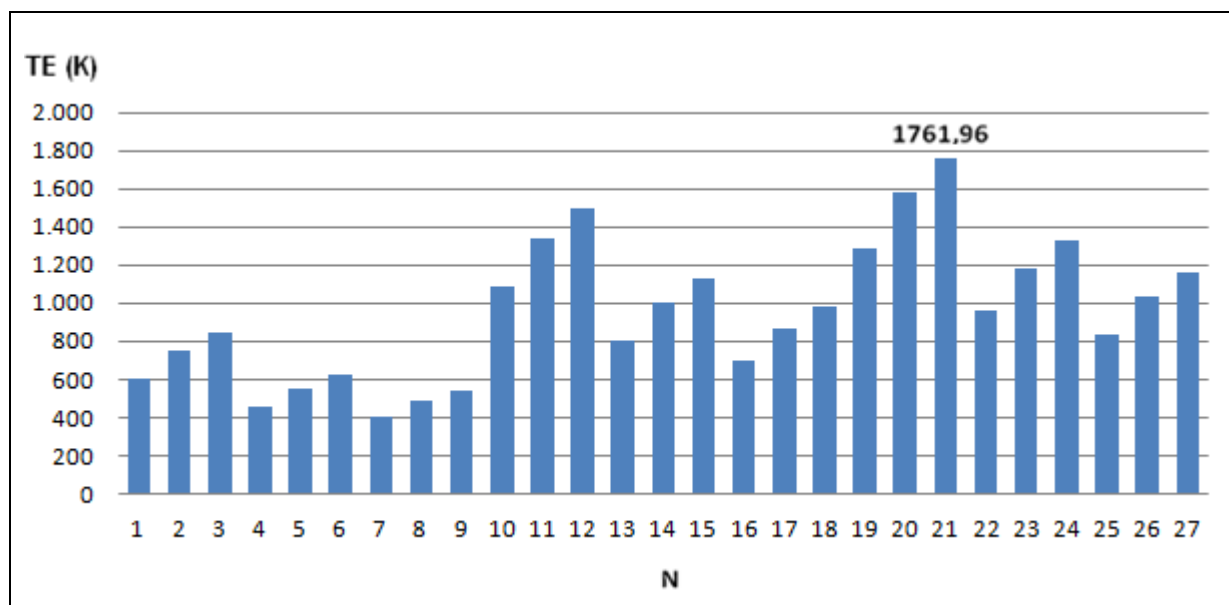


Figura 4.3- Temperatura de equilíbrio obtida nos 27 experimentos realizados.

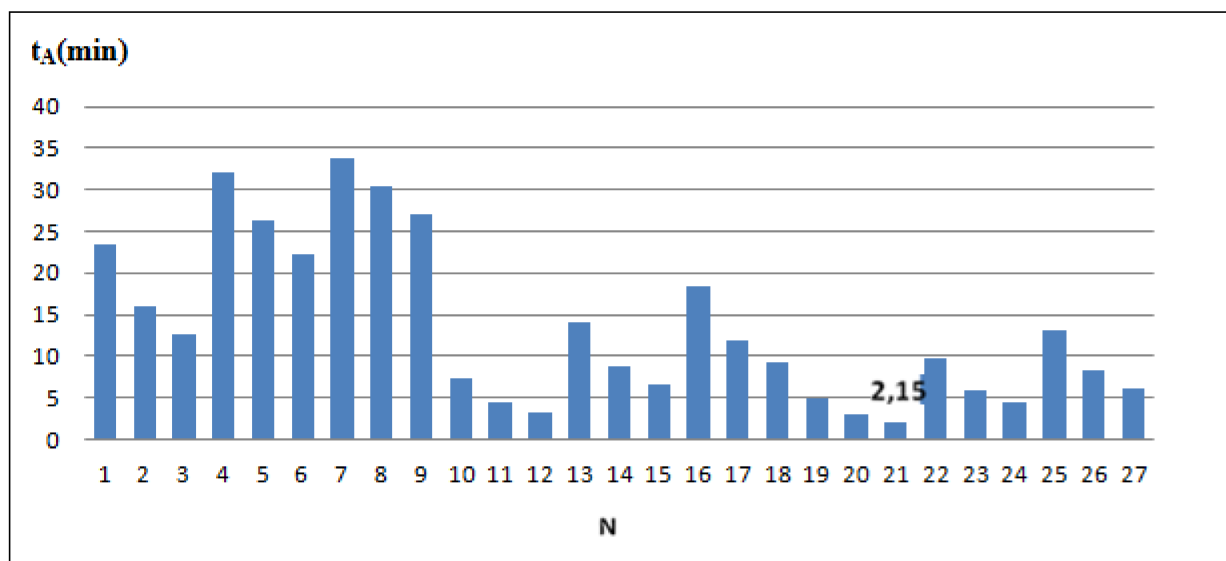


Figura 4.4- Tempo de aquecimento obtido nos 27 experimentos realizados.

A partir dos dados obtidos, um modelo foi ajustado para correlacionar a temperatura de equilíbrio com as variáveis: área da lente de Fresnel (A), massa do corpo de prova (M) e fluxo de radiação solar incidente (G), utilizando o software STATISTICA, conforme mostra a figura 4.5.

$$\text{Modelo: } TE = k * (GA/M)^m \quad (4.2)$$

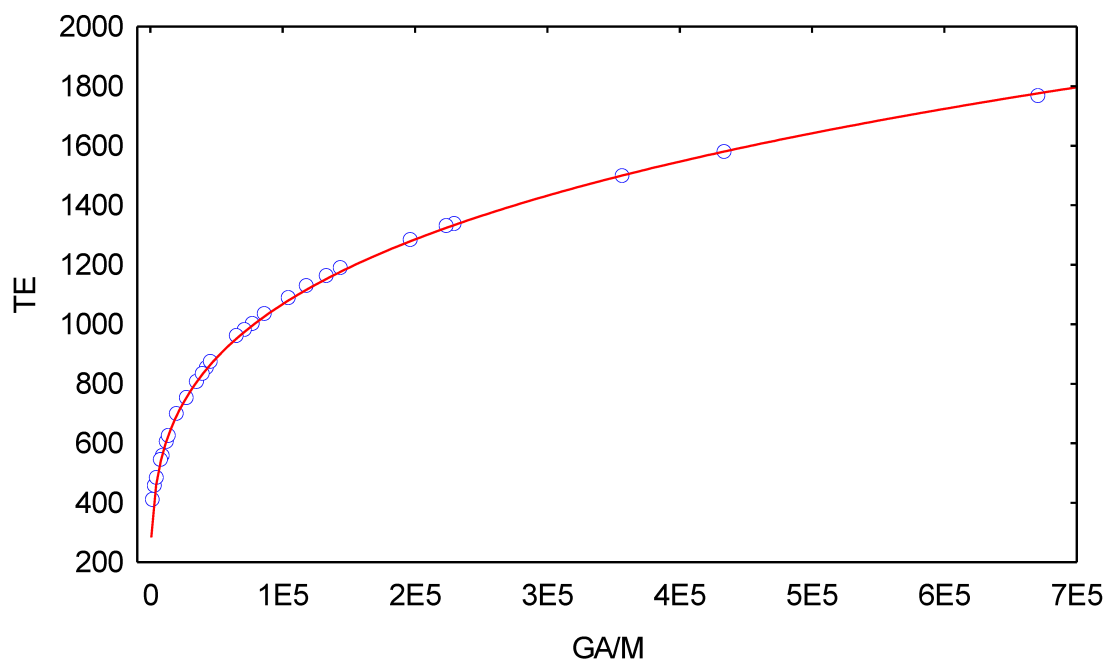


Figura 4.5- Ajuste do modelo para temperatura de equilíbrio em função das variáveis resposta.

$$\text{Modelo: } y = 49,1875 * x^{0,2673} \quad (R^2 = 0,9998)$$

A Figura 4.5 mostra o ajuste dos dados experimentais ao modelo proposto em que o coeficiente de correlação ao quadrado obtido foi de 0,9998. Os parâmetros encontrados foram $k = 49,1875 \pm 0,5785$ (Kg.K/W) e $m = 0,2673 \pm 0,0010$ (considerando m adimensional), conforme a Equação 4.2.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir com relação aos testes de caracterização das cascas de ovos, que:

- A porcentagem mássica média da casca nos ovos é de 11,5%. Valor próximo ao encontrado na literatura, como Oliveira et al. (2009), que observou que a casca pesa 10 % do peso total do ovo.
- Através do teste de granulometria, pode-se perceber que os dados das cascas de ovos moídos foram bem ajustados ao modelo GGS.
- Foi obtido um valor de densidade média para as cascas de ovo moídas igual a $\rho = 2387,3 \text{ (kg/m}^3\text{)}$, valor usado na construção da matriz de planejamento.
- Pela determinação analítica de carbonato de cálcio foram obtidos bons resultados para a amostra de carbonato de cálcio branco com erros relativamente pequenos. Entretanto, para a amostra das cascas de ovos moídas foram observados erros significativamente altos, o que evidencia a presença de impurezas na amostra ou a ocorrência de algum erro experimental.

Com relação ao projeto experimental:

- Foram calculados os 27 experimentos da matriz de planejamento. Na linha 21 obteve-se a maior temperatura de equilíbrio num menor tempo de aquecimento. Isso se deve ao fato de que quando se tem a maior área da lente de Fresnel (A), a menor Massa do Corpo de Prova (M) e o maior Fluxo de Radiação Solar Incidente (G), obtêm-se a máxima temperatura de equilíbrio num menor tempo de aquecimento.
- Foi obtido o ajuste do modelo para a temperatura de equilíbrio em função das variáveis resposta, através do software STATISTICA, com ajuste satisfatório.

5.2 SUGESTÕES

A fim de dar continuidade a este trabalho, algumas sugestões são propostas para trabalhos futuros:

- A fim de se validar a metodologia utilizada para descrever a dinâmica de aquecimento do corpo de prova realizar testes experimentais em uma unidade de bancada que acople uma lente Fresnel a um reator de decomposição das cascas em cal;
- Realizar ensaios experimentais mediante manipulação da carga mássica, distribuição granulométrica, radiação solar e tempo de exposição à luz solar concentrada, tanto para as cascas de ovos quanto para o carbonato de cálcio, a fim de acompanhar as taxas de conversão dos carbonatos em cal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. A. *Aproveitamento do caroço da manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar*. 2014. 126f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

BARBOSA, R. C. *Estudo do aproveitamento de resíduo de mineração rico em calcário para produção de cal e captura de dióxido de carbono*. 2014. 94f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo de casca de ovo visando seu aproveitamento em revestimento cerâmico poroso. *Revista Cerâmica Online*, 2006, vol.52, n.324, p.240-244. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132006000400004&script=sci_abstract&tln=pt>. Acesso em 25 set.2017.

GARCIA, D. M. *Forno solar com lentes de Fresnel e Aplicações em laser solar*. 2013.87f. *Dissertação de Mestrado* – Univesidade Nacional de Lisboa, Lisboa, 2013.

GUEDES, F. H. *Reaproveitamento de resíduo de casca de ovo e chamote na produção de material cerâmico para isolamento térmica*. 2014. 170f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.

OLIVEIRA, D. A.; BENELLI,P.; AMANTE,E. R. Valorização de resíduos sólidos: casca de ovos como matéria-prima no desenvolvimento de novos produtos. . *2nd International Workshop | Advances In Cleaner Production*. São Paulo, 2009. 11p.

PRADO, G. O.; ULHOA, T. F.; DAMASCENO, J. J. R.; VIEIRA, L. G. M. Estado da arte em mecanismos de rastreamento solar. *In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA*, v.1 n.2, 2015. Disponível em: <https://pdfdocumento.com/estado-da-arte-em-mecanismos-de-rastreamento-solar_59ce65c21723dd269784e247.html>. Acesso em 18 set. 2017.

RODRIGUES, A. S.; ÁVILA, S. G. Caracterização físico-química da casca de ovo de galinha e utilização como fonte para produção compostos de cálcio. *Revista Virtual de Química*, 2017. Disponível em: <<http://rvq.s bq.org.br>>. Acesso em: 16 set. 2017.