



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

RAELSON SALVINO DE MENDONÇA

**DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS DE
PLACAS DE GESSO EM FORNO CONTÍNUO DE
ELEMENTO MÓVEL HELICOIDAL**

Recife

2015

RAELSON SALVINO DE MENDONÇA

**DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS DE
PLACAS DE GESSO EM FORNO CONTÍNUO DE
ELEMENTO MÓVEL HELICOIDAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem de Processos

Orientador: Prof^o. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientador: Prof^o. Dr^a. Eliane Cardoso de Vasconcelos

Recife

2015

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

M539d	<p>Mendonça, Raelson Salvino de Desidratação térmica de resíduos de placas de gesso em forno con tínuo de elemento móvel helicoidal / Raelson Salvino de Mendonça ; orientador Valdemir Alexandre dos Santos ; co-orientador Eliana Cardoso de Vasconcelo, 2015. 119 f. : il.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-graduação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2015.</p> <p>1. Gesso - Reaproveitamento. 2. Resíduos sólidos - Reaproveitamento. I. Título.</p> <p>666.913</p> <p>CDU</p>
-------	--

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

DESIDRATAÇÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS DE PLACAS DE GESSO EM FORNO CONTÍNUO DE ELEMENTO MÓVEL HELICOIDAL

RAELSON SALVINO DE MENDONÇA

Comissão Examinadora

Profº. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos (Orientador)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profº. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Junior (Titular Interno)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profº. Dr. Carlos Costas Dantas (Titular Externo)
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Defendida em 09/02/2015

Coordenadora: Profª. Drª. Clarissa Daisy Costa Albuquerque

Ao senhor Jesus Cristo, pois nada acontece por acaso, e não foi por acaso que recebi o dom da vida, aos amigos, e em especial a minha mãe pela dedicação e cumplicidade.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

“Melhor é o fim das coisas do que o princípio delas; melhor é o paciente de espírito do que o altivo de espírito.”

(EC 7:8)

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pois sem ela nenhuma realização, na minha vida, seria possível.

As minhas mães, Maria José e Rita Alexandre, pelo esforço companheirismo e dedicação e apoio incansável pela minha educação.

A minha amada esposa, Vanessa Santana, que diante das adversidades nunca deixou de me apoiar em meus sonhos e projetos.

Ao orientador Valdemir A. dos Santos, pelo apoio e confiança, como também, por compartilhar suas experiências e conhecimentos, fundamentais para realização do projeto.

Aos professores, que contribuíram com ensinamentos indispensável para realização confecção do presente trabalho.

A FACEPE, pela bolsa concedida, em parceria com A Universidade Católica de Pernambuco, que cedeu espaço para realização dos experimentos.

A todos meus amigos do mestrado e em especial a, Ricardo Vandr , pela amizade ao longo da vida acadêmica.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	XI
CAPÍTULO 1	XI
CAPÍTULO 2	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
CAPÍTULO 1	XIII
CAPÍTULO 2	XIII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	2
2 OBJETIVOS	5
2.1 OBJETIVO GERAL	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3 REVISÃO DA LITERATURA	6
3.1 HISTÓRICO	6
3.2 RESERVAS BRASILEIRAS DE GIPSITA	7
3.3 ASPECTO ECONÔMICO DA GIPSITA: REGIÃO DO ARARIPE	8
3.4 PROCESSOS PRODUTIVOS DO GESSO	8
3.4.1 ETAPAS DO PROCESSO PRODUTIVO DO GESSO	9
3.4.1.1 A LAVRA DA GIPSITA	9

Mendonça, R. S. Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

3.4.1.2 O BENEFICIAMENTO DA GIPSITA	10
3.4.1.3 CALCINAÇÃO – DESIDRATAÇÃO DA GIPSITA	10
3.5 OBTENÇÃO DO GESSO POR DESIDRATAÇÃO TÉRMICA	11
3.6 DIFERENCIAÇÃO ENTRE O GESSO ALFA E O GESSO BETA	13
3.7 PLANTAS DE FABRICAÇÃO DE GESSO	15
3.7.1 FORNO PANELA	15
3.7.2 FORNO MARMITA	17
3.7.3 FORNO TUBULAR	19
3.8 RECICLAGEM DE GESSO NO BRASIL	26
3.9 CONCEITOS DE VELOCIDADE E ENERGIA DE ATIVAÇÃO	27
3.9.1 MÉTODOS NÃO-MECANÍSTICOS	28
3.9.2 MÉTODOS MECANÍSTICOS	33
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
<u>CAPÍTULO 2</u>	40
RESUMO	42
1. INTRODUÇÃO	42
2 MATERIAL E MÉTODO	43
2.1 FORNO CONTÍNUO DE ELEMENTO MÓVEL HELICOIDAL	43
2.2 RESÍDUOS DE PLACAS DE GESSO	45
2.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	47
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS	60

CAPÍTULO 3 **64**

ANEXOS **65**

OPTIMISATION OF RECYCLABLE BETA PLASTER USING PLASTER WASTE IN A CONTINUOUS REACTOR WITH A MOBILE HELICAL ELEMENT	66
ABSTRACT	67
1. INTRODUCTION	67
2 MATERIAL AND METHODS	69
2.1 CONTINUOUS REACTOR WITH MOVABLE HELICAL ELEMENT	69
2.2 WASTE PLASTERBOARD	70
2.3 PLANNING OF EXPERIMENTS	72
3. RESULTS AND DISCUSSION	74
4. CONCLUSIONS	86
REFERENCES	87
NORMAS PARA SUBMISSÃO EM PERIÓDICO INTERNACIONAL	90
DEPÓSITO DE PATENTE	104

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1- Fluxograma do processo produtivo do gesso e seus artefatos	9
Figura 1.2 - Frente de lavra de gipsita da Mineração Campo Belo em Araripina-PE	10
Figura 1.3 - Cristais do Gesso Beta: cristais pequenos (menores que 10 μ m), mal formados e porosos.....	14
Figura 1.4 - Cristais do Gesso Alfa: cristais grandes (em torno de 20 μ m), bem formados e sem poros.....	15
Figura 1.5 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando o Forno tipo Panela	16
Figura 1.6 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Marmita Vertical	18
Figura 1.7 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Rotativo	20
Figura 1.8 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno de Moinho Calcinador/Sistema Flash Dryer	23
Figura 1.9 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Marmita Rotativo	24
Figura 1.10 - Fluxograma de produção de gesso alfa em autoclave aquecido com vapor.....	25
Figura 1.11 - Fluxograma de produção de gesso alfa por desidratação em meio líquido.....	26

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Esquema com componentes do forno contínuo piloto de elemento móvel helicoidal.....	45
Figura 2 – Fotografia do forno contínuo de elemento móvel helicoidal	45
Figura 3 – Gráfico do comportamento da conversão da reação de desidratação térmica em função da granulometria das partículas do resíduo de placas de gesso.....	47
Figura 4 - Micrografia MEV de gesso beta produzido pelo forno contínuo helicoidal	50
Figura 5 - Response surface of unitary mass in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues	53
Figura 6 - Response surface of compression strength in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues	54
Figura 7 - Response surface of Shore hardness in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues	55

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Figura 8- Desirability function for optimal conditions of the plasterboard residues thermal dehydration	56
Figura 9 - Plot of the Desirability global function for optimal conditions of the plasterboard residues thermal dehydration	57
Figura 10 - Conversion of thermal dehydration for plasterboard residues in function of reaction time in a helical mobile element reactor	58
Figura 11 - Ajuste dos dados experimentais de conversão dos resíduos de placas de gesso no forno contínuo de elemento móvel helicoidal à lei cinética de Avrami-Eurofe'ev, n=2 $\alpha = 1 - \left(e^{-k^2 \cdot t^2} \right)$	59

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Características do forno tipo Panela produzindo gesso beta	17
Tabela 1.2 - Características do forno tipo Marmita produzindo gesso	19
Tabela 1.3 - características do forno tipo rotativo com aquecimento direto produzindo gesso	21
Tabela 1.4 - Informações gerais sobre os fornos em operação no Araripe	22
Tabela 1.5 - Características do forno tipo marmita rotativo produzindo gesso beta	24

CAPÍTULO 2

Tabela 1 – Composição química do resíduo obtidos de placas de gesso	46
Tabela 2 - Real and coded values (+ higher level, 0 intermediate, - lower level) for the independent variables in the CCRD (2 ²) for thermal dehydration of residues of plasterboard	49
Tabela 3 - Matrix of CCRD (2 ²) with independent variables and response values for thermal dehydration of residues of plasterboard	50
Tabela 4 - Variance analysis for validation of mass unitary predictive model...	51
Tabela 5 - Variance analysis for validation of compressive strength predictive model	51
Tabela 6 - Variance analysis for validation of Shore Hardness predictive model	52

RESUMO

No Brasil o tratamento de resíduos de demolição e construção (RDC), é uma questão ambiental pouco abordada, em especial os resíduos de gesso. Entretanto, ocorreu a alteração da Resolução nº 307 do CONAMA, que estabeleceu nova classificação para o gesso, de resíduo tipo C para resíduo tipo B. Isso representou uma lenta, porém progressiva busca pela racionalização dos processos construtivos visando baixar custos de construções e aumentar a produtividade. No presente trabalho foram investigadas condições de temperatura, pressão e tempo, necessárias à obtenção de gesso beta reciclável, a partir de resíduos de placas de gesso. Os experimentos foram realizados em um forno contínuo com elemento móvel helicoidal, desenvolvido para permitir um controle eficiente das condições de calcinação dos resíduos. Inicialmente, esses resíduos foram calcinados sob pressão e temperatura variáveis, com a aplicação de um delineamento composto central rotacional (DCCR). Após identificação de condições otimizadas de calcinação, investigou-se e foi definido o mecanismo cinético responsável pela reação de desidratação dos resíduos de placas de gesso.

Palavras-chave: Desidratação térmica, Grau de conversão, Água de cristalização, DCCR, Misturador tipo helicóide.

ABSTRACT

In Brazil the treatment of demolition waste and construction (DRC), is an environmental issue rarely addressed, especially gypsum waste. However with change of Resolution N° 307, of CONAMA which established new classification for plaster Waste, of waste type C to Waste type B. It represented a slow but progressive quest for rationalization of constructive processes to lower costs of constructions and increase productivity. In this work conditions of temperature, pressure and time, required to produce recycled beta gypsum from waste of blocks and plates plaster were investigated. were calcined under constant pressure and temperature, varying only the reaction time, 6 samples of gypsum waste. tests will verify values of the water of hydration to confirm the attainment of conversion of the reaction. With the results obtained are determined the kinetic parameters of the reaction for the production of recycled gypsum beta.

Key-words: Thermal dehydration, conversion degree of crystallization water.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O gesso é um mineral chamado gipsita, cujos termos sinônimos “gipso” e “gesso” são usados frequentemente (LINHARES, 2003). Segundo Santos (1996), a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), matéria-prima para a produção de hemidrato ou gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), são compostos derivados do sulfato de cálcio existente na natureza sob duas formas estáveis: uma pouco utilizada industrialmente é a anidrita natural (CaSO_4) e a outra é o dihidrato ou gipsita, encontrada abundantemente na natureza.

O grande interesse pela gipsita é atribuído a uma característica peculiar que consiste na facilidade de desidratação e reidratação. A gipsita perde 3/2 da água de cristalização durante o processo de calcinação, convertendo-se a um sulfato de cálcio hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), e quando misturado com água, pode ser moldado e trabalhado antes de endurecer e adquirir a consistência mecânica da forma reidratada e estável (BALTAR, BASTOS, LUZ, 2008).

Comercialmente o gesso encontra a sua maior aplicação na indústria da construção civil, embora também seja muito utilizado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários; como agente desidratante; como aglomerante do giz e na briquetagem do carvão. Por sua resistência ao fogo, se emprega gesso na confecção de portas corta fogo; na mineração de carvão para vedar lâmpadas, engrenagens e áreas onde há perigo de explosão de gases. Isolantes para cobertura de tubulações e caldeiras são confeccionados com uma mistura de gesso e amianto. Isolantes acústicos são obtidos pela adição de material poroso ao gesso (SOBRINHO et al., 2001).

Ao longo dos últimos anos a utilização do gesso na construção civil brasileira vem crescendo gradativamente. Tendo impulso com a introdução da tecnologia drywall nas vedações internas de todos os tipos de edificações no país, a partir de meados da década de 1990. A essa forma de utilização se somam todos os usos tradicionais do gesso como material de revestimento, aplicado diretamente em paredes e tetos, e como material de fundição, utilizado na produção de placas de forro, sancas, molduras e outras peças de acabamento

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYALL, 2009).

Ainda segundo ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYALL (2009) todas essas formas de utilizações geram resíduos. E a gestão destes, da mesma forma que ocorre com outros materiais empregados nos canteiros de obras, passou a demandar atenção cada vez maior dos construtores, em razão das rigorosas exigências da legislação ambiental brasileira.

No Brasil estão localizados na região do Araripe, no extremo oeste do estado de Pernambuco, a cerca de 700 km da capital, Recife, fazendo fronteira com os estados do Ceará e Piauí, e sendo demarcados pela Chapada do Araripe, os mais importantes depósitos de gipsita do país por apresentarem uma reserva de cerca de 406 milhões de toneladas, de alta pureza (HENRIQUES JR, 2013; PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

A região do Pólo Gesseiro do Araripe (PGA), reúne num só *cluster* perto de 800 empresas, sendo 140 indústrias de calcinação, 49 mineradoras e cerca de 600 empresas fabricantes de produtos pré-moldados de gesso, cuja a produção na região atinge 4,5 milhões de toneladas de gesso por ano, obtidas da extração de 15 milhões de toneladas de gipsita. Desse total de minério, 9,7 milhões de toneladas são destinadas à produção de cimento e de gesso agrícola, e os 5,3 milhões de toneladas restantes vão para a produção indicada de gesso. A produção de pré-moldados ultrapassa 125 milhões de unidades por ano. Todo esse conjunto de produtos corresponde a 97% da produção nacional (HENRIQUES JR, 2013)

Segundo dados do SINDUSGESSO apud Henrique (2013), as empresas calcinadoras produziram em 2012 cerca de 4,5 milhões de toneladas, principalmente de gesso do tipo beta, dos quais 61% foram destinados à fabricação de placas e blocos, 35% para revestimento, 3% para moldes cerâmicos e 1% para outros usos.

Esse grande volume de produção proporciona ao gesso um amplo campo de aplicação na construção civil, tornando as perdas na construção significativas.

No Brasil, estima-se que 5% do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção. Já o gesso aplicado como revestimento

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

diretamente sobre alvenaria gera uma quantidade maior de resíduos, em torno de 35% (SINDUSGESSO, 2006, apud MUNHOZ; RENÓFIO, 2006).

A gestão desses resíduos hoje é visto como um problema a nível nacional, a exemplo disso nos Estados Unidos o produto tem sido banido de vários aterros sanitários, assim também no Brasil, uma vez que decomposição do resíduo de gesso em aterros leva a geração de gás sulfídrico que possui odor característico de ovo podre, devido às reações do sulfato com a matéria orgânica (CIWMB, 2013; GESSO LAR, 2013).

A geração de resíduo de gesso de construção representa um problema econômico com graves consequências e impacto ecológico, pois esse resíduo é um material tóxico que libera íons Ca^{2+} e SO_4^{2-} alterando a alcalinidade do solo e contaminando os lençóis freáticos (GESSO LAR, 2013).

Diante desse contexto o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) considerou a necessidade de implementar novas diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos dessa grande aplicabilidade do gesso. Com a entrada em vigor da Resolução n.º 307/2002, foram disciplinadas as ações necessárias, de forma a minimizar os impactos ambientais (LIMA FILHO, 2010).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Produzir gesso beta reciclável em um forno contínuo de elemento móvel helicoidal, desenvolvido para permitir um controle eficiente dos parâmetros operacionais e cinéticos, na calcinação de resíduos de placas de gesso.

2.2 Objetivos Específicos

- Adaptar as instalações laboratoriais de um forno contínuo de elemento móvel helicoidal, para produção do gesso beta reciclável.
- Definir condições de calcinação de resíduos de gesso governadas pela etapa química de reação.
- Aplicar um DCCR para definir condições otimizadas de produção de gesso reciclável.
- Investigar qual modelo cinético é responsável pela calcinação dos resíduos utilizados.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Histórico

O uso do gesso como material construtivo como sua técnica de produção remonta as histórias das antigas civilizações (GOURDIN; KINGERY, 1975).

Em ruínas na Turquia (Anatólia) e na Síria ano 7000 a.C., foram identificadas sua presença em amostras de materiais como argamassa para pisos, suporte de afrescos e fabricação de recipientes, assim como também as ruínas da cidade de Jericó, em Israel, cujas as amostras são datadas de 6000 a.C, evidenciam o emprego do gesso em moldagem de recipientes e modelagens de afrescos, e a utilização em argamassas de revestimento em ruínas na Síria e na cidade de Anu, no sul do Turquestão (GOURDIN; KINGERY, 1975).

Ainda segundo Gourdin e Kingery (1975) nas pirâmides de Gizé, no Egito, erguida por Quéops, faraó da quarta dinastia egípcia, no ano de 2800 a.C foram encontrados assentamento de material utilizado nas juntas dos blocos das Pirâmides.

Quanto à atividade de extração do minério de gipsita e produção do gesso a documentação mais antiga que se tem relato é o “Tratado da Pedra”, do filósofo Theofraste, discípulo de Platão e Aristóteles que, por volta do ano 300 a.C., relatou a existência de gesseiras na região de Chipre, Fenícia e Síria, cujo material era utilizado como argamassa e para a confecção de elementos decorativos - afrescos e estatuetas (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS, 1982).

A invasão romana, na França, no ano 222 a.C., deu início a disseminação da utilização do gesso no Ocidente quando os processos construtivos com esse material passaram a ser desenvolvidos e difundidos pelos “*pedreiros do gesso*”,

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

cuja técnica é a associação do gesso a madeira (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS 1982).

Mas só em 1768, quando Lavoisier apresentou à Academia de Ciências Francesa o primeiro estudo científico dos fenômenos que são à base da preparação do gesso, daí então nos séculos seguintes, os trabalhos de diversos autores como os de Van t'Hoff e, em especial, o de Lê Chatelier, permitiu abordar uma explicação científica para o fenômeno de desidratação da gipsita (JOHN; CINCOTTO, 2007; PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2001).

E conseqüentemente com a evolução industrial do século XX o gesso passou agregar novas tecnologias deixando o caráter rudimentar tendo maior qualidade e desempenho adequado a novas aplicações, tais como: revestimento de paredes na forma de argamassa e pasta, confecção de componentes pré-moldados para forros e divisórias (apud CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988).

3.2 Reservas Brasileiras de Gipsita

No Brasil as formações gipsíticas estão associadas às bacias sedimentares Amazônica (Amazonas e Pará); do Parnaíba (Maranhão e Tocantins); Potiguar (Rio Grande do Norte); do Araripe (Piauí, Ceará e Pernambuco); e do Recôncavo (Bahia). Nestes domínios geológicos, três Estados concentram 97,6% das reservas medidas: Camamu, na Bahia (53,3%), Aveiro, no Pará (21,9%) e em Pernambuco (22,4%) (SOBRINHO et al., 2009), onde a produção de gesso é concentrada no Pólo Gesseiro do Araripe, região do extremo oeste do Estado de Pernambuco, envolvendo os Municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade, e é responsável por 95% da produção brasileira (Baltar et. al, 2005). As jazidas do Araripe são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo no, diz respeito principalmente ao alto teor de pureza da gipsita que varia de 88% a 98% (BALTAR et al., 2004; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2010).

3.3 Aspecto Econômico da gipsita: Região do Araripe

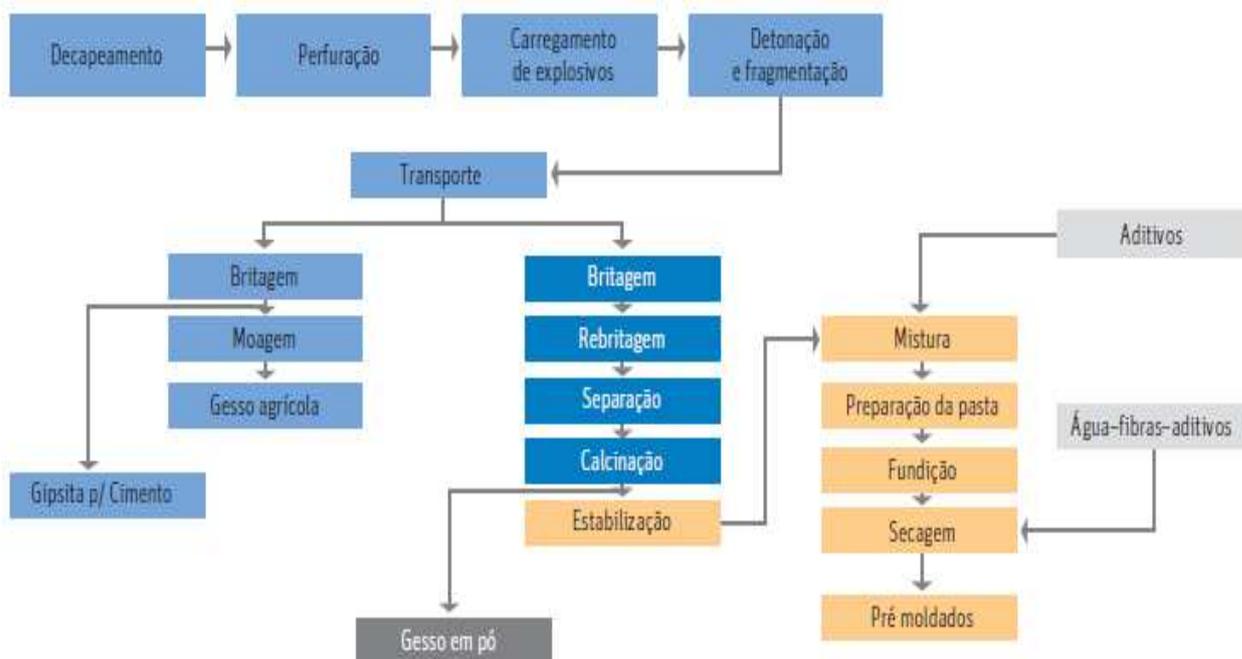
Apresentando índices de crescimento nos últimos três anos entre 10 e 15% ao ano, o setor passa por um bom momento. De 2005 a 2012, ou seja, em sete anos, o número de empresas e a produção praticamente dobraram. O consumo interno, em cerca de 7 anos, passou de 15 kg por habitante/ano para cerca de 21,5 kg, embora esse valor ainda esteja muito aquém em relação a outros países. Na Europa o consumo é de 80 kg por habitante/ano e nos EUA de 118 kg (HENRIQUES JR, 2013).

Todo o mercado do território brasileiro é atendido pelo polo gesseiro, sendo que a região Sudeste concentra cerca de 60% do consumo total de gesso, exatamente por ser aquela onde se registra o maior poder aquisitivo da população. Em seguida, vem a região Sul, entre 15 e 20% do consumo, e a região Nordeste, em torno de 10%. O principal cliente da produção de gesso são as empresas construtoras (HENRIQUES JR, 2013).

3.4 Processos Produtivos do Gesso

Basicamente, o processo industrial da fabricação do gesso, é constituído das seguintes etapas: mineração ou lavra da gipsita, beneficiamento inicial do minério, calcinação, britagem e moagem do gesso, e embalagem (ver Figura 1). A linha de produtos específicos é vasta, sendo possível fabricar, a partir da calcinação, os seguintes itens: gesso de fundição para a fabricação de pré-moldados, gesso de revestimento para acabamento na construção civil, placas e blocos de gesso (pré-moldados), gesso acartonado (drywall), gesso cola e gesso projetado. Diretamente da gipsita são obtidos o gesso agrícola e o “gesso” para emprego na indústria cimenteira (HENRIQUE JR, 2013).

Figura 1.1- Fluxograma do processo produtivo do gesso e seus artefatos



Fonte: Henrique Jr, (2013)

3.4.1 Etapas do Processo produtivo do gesso

3.4.1.1 A lavra da gipsita

Inicialmente faz-se a remoção da camada estéril de material argiloso com cobertura vegetal acima da bancada de gipsita, através do processo de detonação, que obedecendo a um “plano de fogo” são feitos alguns furos no corpo mineral exposto que são preenchidos com uma carga com explosivos (dinamite) e se procede à detonação, operação conhecida como desmonte de bancada. Os blocos de minério despreendidos da bancada após o desmonte, o minério pode ter tamanhos que variam de tonelada a gramas, as maiores necessitam ser reduzidas a pedaços menores com ajuda de rompedores ou com nova detonação, só depois podem ser embarcados em caminhões caçamba e enviados para a planta de calcinação de gesso ou para as fabricas de cimento (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Figura 1.2 - Frente de lavra de gipsita da Mineração Campo Belo em Araripina-PE



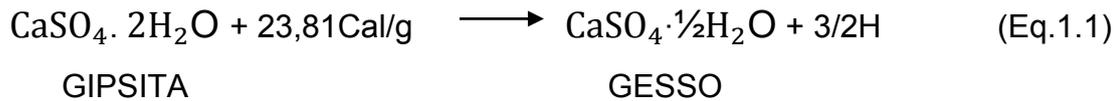
Fonte: Baltar, Bastos e Luz (2008)

3.4.1.2 O beneficiamento da gipsita

Em geral, resume-se a uma seleção manual, seguida de britagem, moagem e peneiramento. É comum o uso de britadores de mandíbula e moinhos de martelo. Em alguns casos, a britagem é realizada em dois estágios, em circuito fechado com peneiras vibratórias a seco. O produto resultante das operações de cominuição deve apresentar uma distribuição granulométrica uniforme, a fim de evitar uma desidratação desigual para as partículas de gipsita (BALTAR; BASTOS; LUZ ,2008).

3.4.1.3 Calcinação – Desidratação da Gipsita

A calcinação do minério de gipsita consiste, basicamente, na desidratação térmica do sulfato de cálcio di-hidratado, cujo resultado é a perda de 3/2 da água de cristalização, da gipsita, convertendo-se a um sulfato de cálcio hemidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), conforme a equação abaixo (BALTAR; BASTOS; LUZ ,2008).



A gipsita calcinada é intensamente utilizada pela indústria de construção civil para revestimento de paredes, placas, blocos, painéis, etc, é também muito utilizado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários, e como aglomerante do giz (MUNHOZ; RENÓFIO, 2006; SANTOS, 1996). Quando reidratada o hemidrato forma uma pasta que em seguida endurece, recompondo o sulfato de cálcio dihidratado. Para acelerar ou retardar a pega, podem ser utilizados aditivos especiais, dependendo da finalidade desejada (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

3.5 Obtenção do gesso por desidratação térmica

Quando o minério de gipsita é aquecido, de 20°C a 1250°C, Segundo Santos (1996) e Daligand (1985), podemos obter cinco fases do sulfato de cálcio:

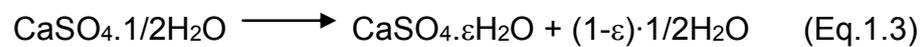
a) Na temperatura ambiente o minério de gipsita é essencialmente sulfato de cálcio dihidratado; que ao ser aquecido a temperatura de 60°C inicia-se a perda de água de cristalização presente na gipsita com formação do semi-hidrato (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008);

b) Em temperaturas de 100°C tem-se início a desidratação da gipsita para formação dos hemidratos alfa ou beta, a formação de um ou do outro irá depender das condições de operação. A esta temperatura a cinética da reação é muito lenta, sendo assim em processos industriais, a velocidade requerida de produção é conseguida trabalhando-se em uma faixa de temperatura entre 140 e 160°C (SANTOS, 1996);

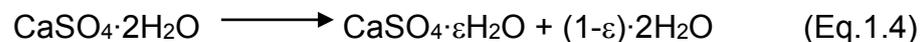


Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

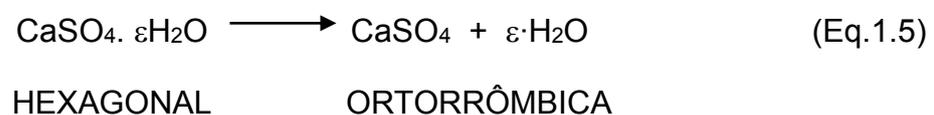
c) Quando a temperatura de 200⁰C é alcançada o hemidrato perde quase toda a sua água de cristalização e obtém-se uma anidrita solúvel (instável), denominada anidrita III. A anidrita solúvel, de fórmula CaSO₄·εH₂O, indica que este produto pode conter água de cristalização, embora em baixo teor (CINCOTTO; AGOPYAN; FLORINDO, 1988), ε variando entre 0,11 a 0,06. Este tipo de anidrita confere ao gesso uma redução em suas propriedades mecânicas, devido às condições adversas em que é formada no processo (excesso de temperatura). Sendo muito reativa, transforma-se em hemidrato com a umidade do ar (DALIGAND, 1985):



Sendo a produção de anidrita, às vezes, possível diretamente da gipsita (SANTOS, 1996):



d) A transformação de Anidrita III em II ocorre para o beta-hemidrato, quando a temperatura alcança 350⁰C (SANTOS, 1996), e para o alfa-hemidrato, quando a temperatura do sólido calcinado atinge 220⁰C (DALIGAND, 1985);



A anidrita II, ou anidrita insolúvel, pode ser obtida de 350 a 800⁰C. Entre 700 e 800⁰C, é denominada de gesso “calcinado até a morte”. Sua calcinação entre 400 e 500⁰C, produz uma anidrita utilizada como um dos constituintes dos gessos de construção, principalmente o gesso de revestimento de parede, por

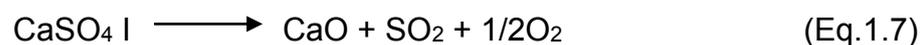
Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

conferir resistências especiais à erosão e à compressão para a mistura final (SANTOS, 1996).

e) Quando se calcina o minério de gipsita acima de 800⁰C (SANTOS, 1996) ou à 1230⁰C, a anidrita II transforma-se em anidrita I, que é bastante similar a anidrita natural encontrada no minério de gipsita, com hidratação extremamente difícil (DALIGAND, 1985);



f) Quando se atinge temperaturas de calcinação acima de 1250⁰C, tem-se a decomposição da anidrita I em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico (DALIGAND, 1985);



3.6 Diferenciação entre o gesso alfa e o gesso beta

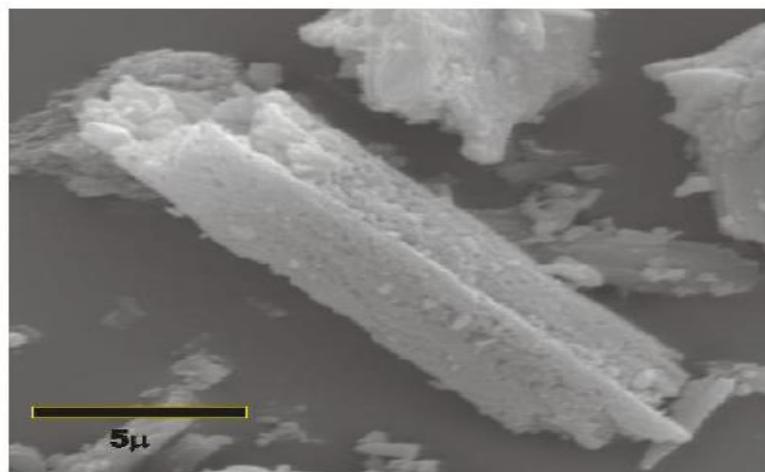
Dependendo do processo de produção a calcinação do hemidratado a ser produzido poderá possuir duas formas diferentes: alfa (α) e beta (β) Normalmente, a forma alfa (α) é produzida por métodos úmidos, a desidratação da gipsita é obtida em uma suspensão aquosa ácida ou hidrotermicamente na presença de eletrólitos, numa faixa de temperatura de 120 a 180⁰C, a gipsita é desidratada em hemidrato (α) ou gesso (α) ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$). A transformação se efetiva com eliminação de água a baixas pressões de vapor e formação de cristais de estrutura aberta. Enquanto que a forma beta (β) é produzida por via seca, com uma variação de temperatura entre 120 e 160⁰C e altas pressões de

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

vapor de água, a gipsita é desidratada em hemidrato (β) ou gesso (β). Uma transformação cuidadosa e lenta permite a obtenção de cristais de forma alongada-prismática ou de bastão. Porém, se o processo de transformação é rápido, cristais principalmente de forma acicular ou de agulha são produzidos, o gesso (β) assim obtido é de baixa qualidade (FOLNNER, 2002; MELO, 2013; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

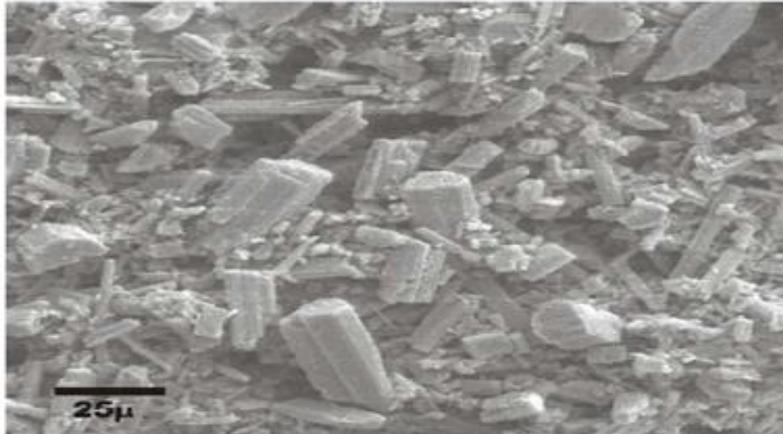
As Figuras 1.3 e 1.4 apresentam as micrografias de pastas de gesso alfa e beta, mostrando que a forma beta apresenta partículas semelhantes a escamas, sem formação pré-definida, possui elevada área superficial devido à sua granulometria fina e cristais porosos (Figura 1.4), portanto, resultando num material de baixa resistência mecânica devido à porosidade elevada. A elevada área específica faz com que o gesso dissolva rapidamente, provocando o crescimento rápido e desordenado de um grande número de cristais de dihidratado, reduzindo ainda mais a resistência mecânica (KANNO, 2009). alfa-hemidrato apresenta cristais com melhor formação (maiores, mais afiados e mais transparentes), absorvem menos água do que a forma beta-hemidrato, pois possui menor área superficial. Resultando portanto num material, com maior resistência mecânica. (KANNO, 2009; SINGH; MIDDENDORF, 2007).

Figura 1.3 - Cristais do Gesso Beta: cristais pequenos (menores que $10\mu\text{m}$), mal formados e porosos



Fonte: Kanno (2009)

Figura 1.4 - Cristais do Gesso Alfa: cristais grandes (em torno de 20 μ m), bem formados e sem poros



Fonte: Kanno (2009)

A hidratação dos hemidratos alfa e beta possuem comportamentos semelhantes, porém com algumas diferenças: o período de indução do alfa-hemidrato é mais curto quando comparado ao beta-hemidrato, que subsequente se hidrata mais rápido devido a sua área superficial (SINGH; MIDDENDORF, 2007).

3.7 Plantas de Fabricação de Gesso

No Pólo Gesseiro do Araripe, as variedades dos tipos de plantas são caracterizadas pelo tipo de forno, equipamento principal do processo de calcinação. Podendo se observar os seguintes tipos de fornos: Panela, Marmita vertical, Marmita rotativa e fornos Rotativos tubulares, esses para a fabricação do gesso beta (β) e autoclaves para a fabricação do gesso alfa (α) (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

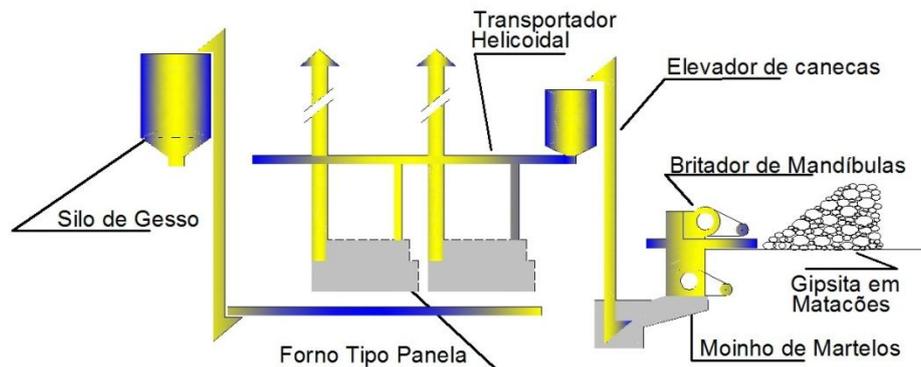
3.7.1 Forno Panela

A calcinação em forno tipo panela foi utilizada em grande quantidade no Araripe até o final da década de 90 do século passado e atualmente existem

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

apenas em algumas empresas, normalmente utilizando lenha como combustível (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008). Um fluxograma do típico de fábricas que utilizam fornos Panela está apresentado na (Figura 1.5).

Figura 1.5 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando o Forno tipo Panela



Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

Esse tipo de forno Panela apresenta como vantagens em relação aos demais fornos empregados:

- A possibilidade de operação sem instrumento para controle da temperatura;
- A possibilidade de obtenção de praticamente todos os tipos de gesso Beta;
- A simplicidade de manutenção;
- Baixo custo de reposição de peças.

Esses fornos ainda confeccionados na região por algumas oficinas, localizadas nos municípios de Araripina e Trindade. No passado eram também produzidos pelos fabricantes de gesso em suas próprias empresas (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

As características do forno Panela e os coeficientes técnicos e de

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

consumo, quando produzindo gesso, estão apresentados na (Tabela 1.1).

Tabela 1.1 - Características do forno tipo Panela produzindo gesso beta

Características	Unidade	Lenha
Consumo de combustível	kg (lenha) /ton. (gesso)	525,00
Poder calorífico da lenha (inferior)	kcal/kg	3.131,20
Consumo de calorías por tonelada de gesso	kcal/ton.	1.643.800,00
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	154.000,00
Eficiência térmica	%	45,0

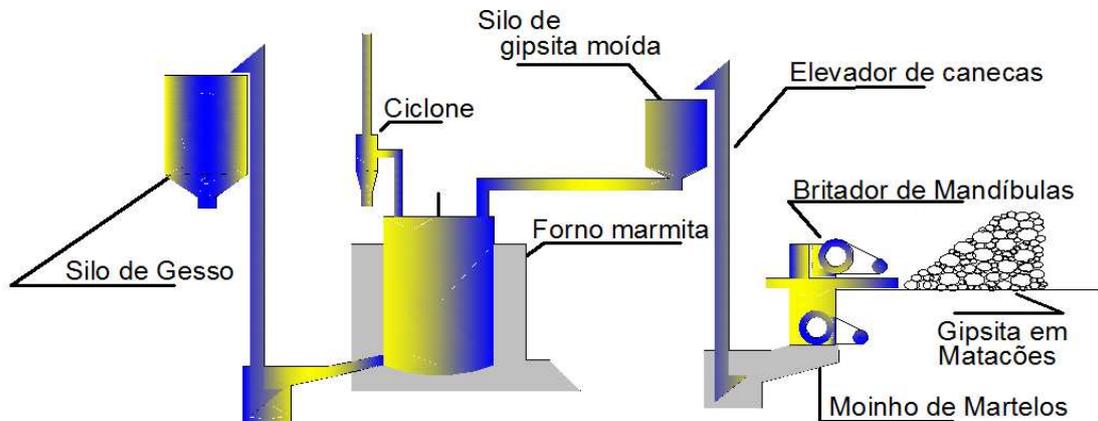
* Lenha - Densidade Volumétrica = 350 kg/St (estéreis); Umidade = 20% m/m. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

3.7.2 Forno Marmita

O forno Marmita Vertical foi introduzido na região do Araripe, na década de 80, com o apoio do Instituto Tecnológico de Pernambuco - ITEP. Uma grande parte desse tipo de forno ainda opera atualmente, consumindo óleo BPF (óleo preto) ou lenha como combustível. Um fluxograma típico desse tipo de fabrica esta apresentado na Figura 1.6, onde podem ser distinguidas as seguintes operações: britagem, moagem, calcinação ou desidratação, moagem fina e embalagem (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Figura 1.6 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Marmita Vertical



Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

Esse tipo de forno Marmita, apresenta como vantagens em relação aos demais fornos empregados (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008):

- Aumento da produtividade - utiliza menos operários por tonelada de gesso produzida;
- Permite uma maior uniformidade - Produz de uma só vez o que produziriam cerca de cinco fornos tipo Panela (bateladas maiores);
- Permite a utilização de combustível alternativo - pode utilizar tanto a lenha como o óleo preto (BPF) sem necessidade de grandes modificações nas fornalhas;
- Maior rendimento do combustível - Consome uma quantidade menor de lenha por tonelada de gesso produzida;
- Diminui a poluição do ambiente de trabalho - O pó liberado, em cada forno, durante a calcinação é normalmente retido em filtros de manga.

Esse tipo de equipamento ainda é fabricado na região do Araripe pela Metalúrgica MENKAURA em Araripina, e produz cerca de 700 kg/h de gesso com ciclo de calcinação em torno de 3 horas. As características dos fornos tipo Marmita Vertical, quando operando com lenha ou óleo preto (BPF) para produzir gesso (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008), estão apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Características do forno tipo Marmita produzindo gesso

Características	Unidade	Lenha*	Óleo**
Consumo de combustível	kg/t	350	45
Poder calorífico dos combustíveis	kcal/kg	3.131	9.770
Consumo de energia por tonelada de gesso	kcal/t	1.095.950	439.650
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/t	154.000	154.000
Eficiência térmica	%	14,0	35,0

* Lenha - Densidade volumétrica = 350 kg/St Umidade= 20% m/m.

** Óleo Preto (BPF) - Densidade = 0,974 kg/l Enxofre= 4,8% pp. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

3.7.3 Forno Tubular

O primeiro forno Tubular Rotativo a operar no Araripe foi o da empresa São Miguel, fabricante do gesso Gypsum, utilizando óleo BPF como combustível. Com o passar do tempo, outras empresas começaram a utilizar fornos rotativos acoplados a gaseificadores de lenha e carvão (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Vários desses fornos foram utilizados nas décadas de 80 e começaram a perder importância a partir da década de 90 porque as empresas passaram a optar por fornos com aquecimento indireto como o tipo Marmita Rotativo.

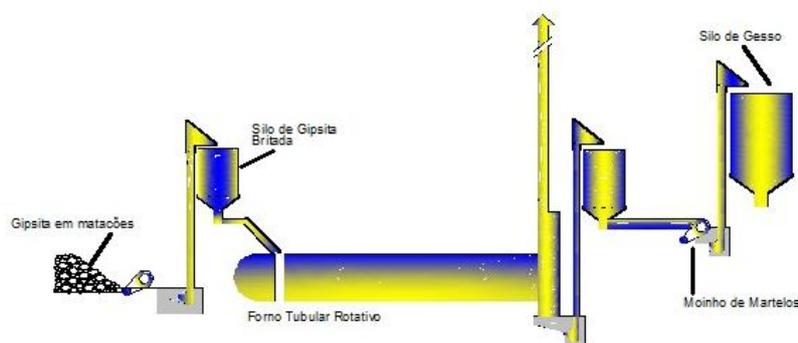
Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Atualmente, existem alguns fornos rotativos em operação na região, em empresas como Gesso Trevo e CALMINA (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Esses fornos, bastante parecidos, produzem cerca de 3 a 4 toneladas de gesso por hora.

O fluxograma típico de uma fábrica que utiliza fornos rotativos está apresentado na Figura 1.7) onde podem ser observadas as seguintes operações: Britagem, Calcinação ou Desidratação, Moagem e Embalagem.

Figura 1.7 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Rotativo



Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

Esse tipo de forno, quando operando com minério moído fino, necessita de mecanismos para retenção de poeira como labirintos, ciclones ou filtros de manga. O forno tipo rotativo, apresenta como vantagens em relação aos demais fornos empregados (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008):

- Produção contínua - Facilita a obtenção de um gesso com características uniformes;
- Maior rendimento térmico - Por utilizar o aquecimento direto (contato da chama com o minério), pode ser facilmente isolável;
- Fornalha Independente - Essa independência permite que se façam as manutenções necessárias com pequenas paradas;

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

- Facilidade de automação - Por ser um processo contínuo, pode ser automatizado com os consequentes ganhos de qualidade e diminuição de custos.

As características dos fornos tipo rotativo, quando utilizando óleo preto (BPF) para produzir gesso, estão apresentados na (Tabela 1.3).

Tabela 1.3 - características do forno tipo rotativo com aquecimento direto produzindo gesso

Características	Unidade	Óleo BPF
Consumo de óleo	kg/t	35
Poder calorífico do óleo	kcal/kg	9.495
Consumo de caloria por tonelada de gesso	kcal/t	332.320
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/t	154.000
Eficiência térmica	%	45,0

* Óleo Preto (BPF) - Densidade = 0,974 kg/litro Enxofre = 4,8% m/m. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

Um resumo das características mais importantes dos vários tipos de fornos em operação no pólo gesseiro do Araripe está apresentada na Tabela 1.4, essas informações permite avaliar de forma mais ampla as vantagens e desvantagens do funcionamento de todos os fornos em operação.

Tabela 1.4 - Informações gerais sobre os fornos em operação no Araripe

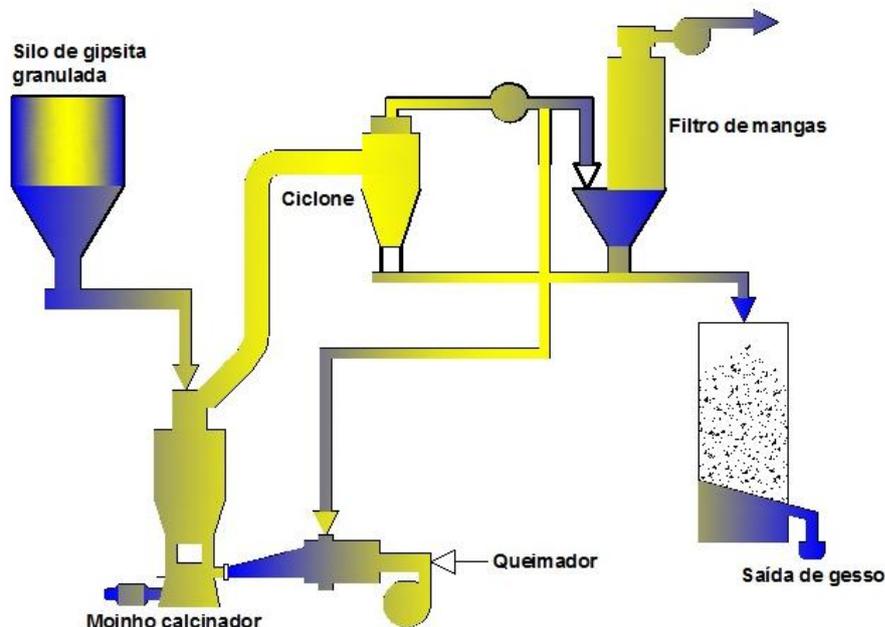
Características	Rotativo tubular	Marmita vertical	Panela
1. Tipo de gesso produzido	Fundição	Fundição e revestimento	Fundição e revestimento
2. Facilidade de controle do tempo de pega	não	sim	Sim
3. Tendência a formar supercalcinado ou cru	sim	não	Não
4. Poluente do ambiente interno	pouco	pouco	Muito
5. Combustível utilizado	BPF	lenha ou BPF	Lenha
6. Consumo combustível (kcal/t de gesso)	332	1.096/440	1.643
7. Investimento	grande	médio	Pequeno
8. Capacidade produtiva (t/h)	2,5 - 3,5	0,6 – 0,8	0,1 - 0,2
9. Manutenção	média	média	Grande
10. Durabilidade (anos)	ND	ND	0,5 -0,6

ND: Não Determinada. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008)

Algumas plantas para calcinação no Brasil já contam com outros tipos de fornos, como a associação do moinho calcinador com o sistema *flash dryer*, utilizados preferencialmente para produção de gesso para acartonado, como mostrado na Figura 1.8. Plantas desse tipo estão em funcionamento nas fábricas da KNAUF e PLACO no Brasil (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Figura 1.8 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno de Moinho Calcinador/Sistema Flash Dryer



Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

A partir da década de 90 XX do século foram introduzidos no Pólo Gesseiro do Araripe os Fornos Marmitta Rotativos. Esses equipamentos, inicialmente fabricados pela GREBLEX (Empresa Francesa, fabricantes de equipamentos para indústria de gesso), passaram a ser produzidos por uma empresa local a SM-Tanques. Esses fornos são fabricados com capacidades de produção de 60 e 120 toneladas por dia e utilizam praticamente todos os tipos de combustíveis disponíveis no Araripe como lenha, coque, óleo BPF e côco de babaçu entre outros. A planta é semi-automatizada com supervisores que gerenciam as operações de carregamento e descarregamento dos silos e do forno monitorando as temperaturas e tempos de residência do material (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

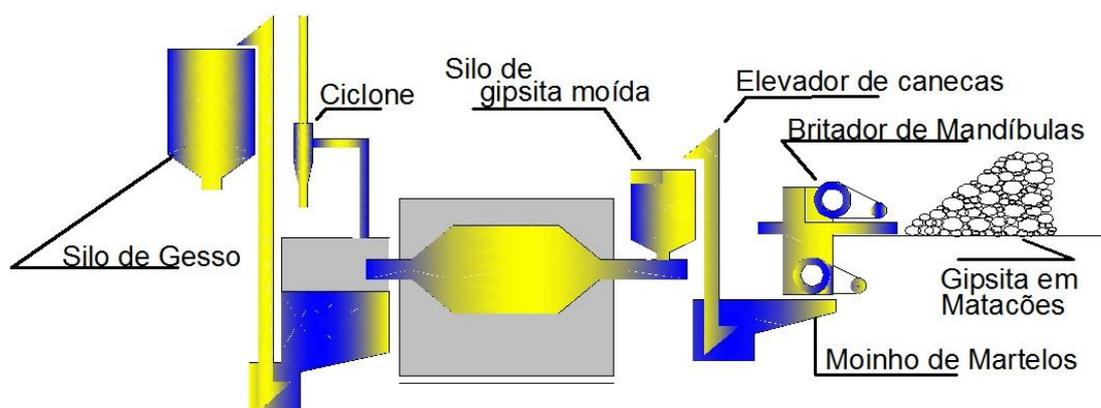
Tabela 1.5 - Características do forno tipo marmita rotativo produzindo gesso beta

Características	Unidade	Lenha	Coque
Consumo de combustível	kg/ton.	350	35
Poder calorífico dos combustíveis	kcal/kg	3.131	-
Consumo de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	1.095.950	-
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	kcal/ton.	154.000	154.000
Eficiência térmica	%	14,0	35,0

* Lenha - Densidade volumétrica = 35 kg/St Umidade= 20% p.p. Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008).

O fluxograma do forno marmita rotativo está apresentado na Figura 1.9, onde podem ser observadas as seguintes operações: Britagem, Calcinação ou Desidratação, Moagem e Embalagem.

Figura 1.9 - Fluxograma típico de uma fábrica de gesso beta usando Forno Marmita Rotativo



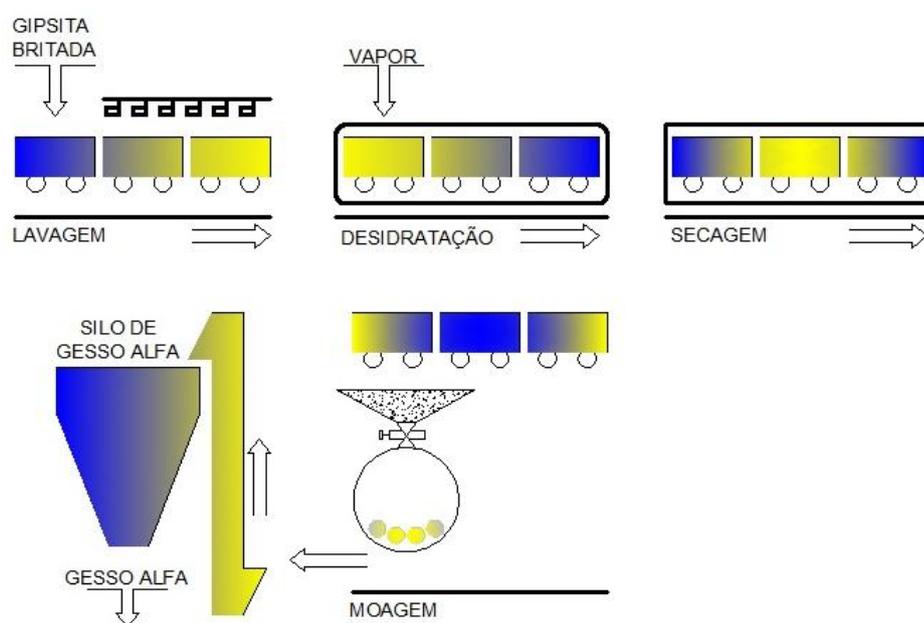
Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Atualmente se produz gesso alfa (α) por dois processos, o primeiro por aquecimento da gipsita em autoclaves sob pressão de vapor (com matacões) e o segundo por aquecimento da gipsita em meio líquido (material moído) (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

A produção de gesso alfa utilizando vapor, como pode ser vista no fluxograma da Figura 1.10, consiste basicamente na britagem do minério para redução de seu tamanho a pedaços de (50 a 70) cm de diâmetro, o material é lavado e colocado na autoclave em carrinhos com rodízio. A autoclave é aquecida com vapor e onde acontece a reação de desidratação, sob temperatura e pressão. Após a conclusão do processo, os matacões são retirados e secos em ambiente aberto, para só depois serem britados, moídos e ensacados em sacos plásticos adequados (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Figura 1.10 - Fluxograma de produção de gesso alfa em autoclave aquecido com vapor

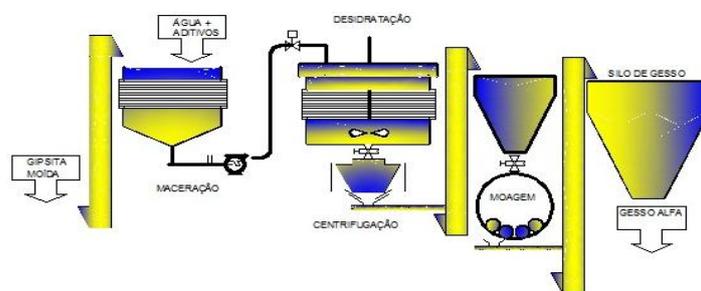


Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

A produção de gesso alfa nesse processo, como mostrado na (Figura 1.11), consiste basicamente na moagem da gipsita em pequenas partículas com diâmetro médio de 2 polegadas, o material é imerso em água para maceração, bombeamento para um reator fechado e aquecido com camisa de vapor onde se processa a reação de desidratação. A suspensão do gesso alfa é então centrifugado e secado, após esse processo e transferido para o silo de estocagem, e empacotamento (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Figura 1.11 - Fluxograma de produção de gesso alfa por desidratação em meio líquido



Fonte: PERES, BENACHOUR, SANTOS (2008)

O mais importante nesse processo é que os cristais do gesso alfa podem ter formatos predefinidos e assim se consegue uma pasta de alta fluidez e peças de gesso de alto desempenho mecânico.

3.8 Reciclagem de gesso no Brasil

O aproveitamento (ou utilização) dos resíduos de gesso no Brasil ganhou uma nova conotação, a partir da resolução CONAMA nº307/02 de julho de 2002 que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil no Brasil. De acordo com a disposição, os resíduos podem ser divididos em quatro classes:

- Classe A são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como;
- Classe B são os resíduos recicláveis para outras destinações;

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

- Classe C são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis;
- Classe D são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (BRASIL, 2002).

Pela Resolução nº 307/2002, o gesso estava enquadrado na Classe C. Entretanto, em 24 de maio de 2011 através da resolução nº431, o CONAMA altera o artigo 3º da Resolução nº307 de 5 de julho de 2002 do CONAMA, e estabelece nova classificação para os resíduos de gesso, sendo enquadrado agora como resíduo da construção civil Classe B reciclável para outra destinação (BRASIL, 2011).

3.9 Conceitos de velocidade e energia de ativação

Os conceitos de constante de velocidade, k , e de energia de ativação, E , para reações no estado sólido, são diferentes quando comparados com os respectivos parâmetros nas reações em fase líquida e gasosa. Nestas últimas, a constante de velocidade é um fator de proporcionalidade entre a velocidade de reação e a concentração inicial dos reagentes (SCHMAL, 1982). Em reações em fase gasosa, depende do catalisador, e pode ser uma função da pressão total. Em sistemas líquidos, ela também pode ser uma função da pressão total e, adicionalmente, pode também depender de outros parâmetros, tais como a força iônica e o solvente escolhido (teve repetição da frase). A constante de velocidade k não é verdadeiramente uma constante, mas apenas independente das concentrações das espécies envolvidas na reação. A quantidade k é também referida como a velocidade específica de reação (constante) e ela é quase sempre fortemente dependente da temperatura (FOGLER, 2002). A energia de ativação E é obtida da dependência de k com a temperatura de acordo com a equação de Arrhenius (LEVENSPIEL, 1974):

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (\text{Eq.1.8})$$

Sendo, R a constante dos gases ideais e T a temperatura absoluta da reação.

Para as reações no estado sólido os conceitos de concentração e de ordem de reação não têm significados. A velocidade de reação é definida como variação da espessura da camada do produto formado com o tempo, ou variação do peso desta camada, ou do número de equivalentes-gramas do produto formado. A constante de velocidade para reações em fase sólida, não pode ser definida da mesma maneira como é para as reações em fase líquida ou gasosa. Se admitirmos as mesmas definições, o citado autor lembra que k seria então independente do tempo, teria o fator s^{-1} em sua fórmula dimensional e aumentaria com a temperatura de acordo com a lei exponencial, da qual uma energia de ativação para a reação poderia ser calculada. É, contudo difícil prever quando essa condição poderá ocorrer, uma vez que os referidos conceitos foram desenvolvidos para sistemas gasosos. Nestes, se admite a existência de um equilíbrio entre as moléculas ativadas e não ativadas, a qual não é válida para reações no estado sólido. Na maioria dos casos, outras circunstâncias que serão responsáveis pela mesma dependência exponencial de k com a temperatura (GOMES, 1961).

3.9.1 Métodos não-mecanísticos

A velocidade de decomposição de uma reação no estado sólido é função da concentração do reagente e da temperatura. Desta forma, isto pode ser descrito por funções distintas como:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(t) \cdot f(\alpha) \quad (\text{Eq.1.9})$$

com a primeira função, $k(T)$, depende da temperatura e a segunda função, $f(a)$, depende da composição da amostra, sendo α a conversão do reagente reacional sólido. Para muitas reações, a dependência da temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius (Eq.1.8), a equação (1.9), se torna: na forma final seguinte:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \cdot f(\alpha) \quad (\text{Eq.1.10})$$

Existem então duas formas de aproximações para a solução da equação (1.10): a aproximação por métodos não-mecanísticos e a que leva em conta o mecanismo da reação (WENDLANDT, 1986).

Os métodos não-mecanísticos utilizam uma simples extensão da análise cinética aplicada às reações homogêneas, de modo que:

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.1.11})$$

Sendo n a ordem da reação de cinética homogênea. Contudo, nas reações em estado sólido, o parâmetro n possui apenas significado empírico. Substituindo-se a equação (1.11) na (1.10), teremos:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp(-E/RT)(1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.1.12})$$

e a cinética da reação pode ser descrita de acordo com os três parâmetros básicos da equação (1.12), isto é, A, E e n.

Quando o processo é isotérmico, a forma mais convencional utilizada é a que se baseia na equação da velocidade (NINAN, 1989):

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (\text{Eq.1.13})$$

Neste caso, para um valor correto de n, o gráfico de (da/dt) em função de (1-a) ⁿ dará uma linha reta com inclinação igual a k. Contudo, o método utilizado pelo referido autor na avaliação dessa tangente era pouco preciso, tendo o mesmo, por isso, recomendado a integração da equação (1.13). Após um rearranjo conveniente, obtemos então:

$$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{(1-n)} = kt \quad (\text{Eq.1.14})$$

a qual se aplica para todos os valores n , com exceção de $n=1$, para esse valor de n a equação obtida é:

$$-\ln(1 - \alpha) = kt \quad (\text{Eq.1.15})$$

O lado esquerdo da equação (1.14) é convenientemente chamado de $g(a)$. Assim, um gráfico $g(a)$ em função de t , dará uma linha reta com inclinação igual a k . O gráfico poderá ser construído para vários valores de n , escolhendo-se como o mais indicado aquele que proporcionou o melhor ajuste. As constantes de velocidade são obtidas a diferentes temperaturas e do gráfico de $\ln(k)$ em função de $1/T$, estima-se E e A .

Um conhecimento a priori da forma aproximada de $g(a)$ ou do valor de n é requerido. Propõem-se a utilização de métodos matemáticos numéricos iterativos na obtenção de valores aproximados de n ou $g(a)$ (NINAN, 1989). Para isso, o referido autor sugere a combinação das equações (1.9) e (1.14), de onde se obtém:

$$g(\alpha) = kt = A \exp(-E/RT)t \quad (\text{Eq.1.16})$$

ou

$$\ln(t) = \ln g(\alpha) - \ln A + \frac{E}{RT} \quad (\text{Eq.1.17})$$

Uma vez que $\ln[g(a)]$ é muito pequeno comparado com $\ln A$, A e E podem ser estimados a partir gráfico de $\ln(t)$ em função de $1/T$.

A grande vantagem de se trabalhar em condições não isotérmicas está no uso de uma simples corrida. Para uma taxa linear de aquecimento, $f = dT/dt$, a equação da velocidade é então:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\phi} \exp(-E/RT) f(\alpha) dT \quad (\text{Eq.1.18})$$

E todos os métodos para obtenção dos parâmetros cinéticos a partir da equação (Eq.1.18) se enquadram, como método diferencial ou integral (HOROWITZ, 1963).

O método diferencial, mais amplamente empregado, baseia-se na escolha arbitrária de $f(a) = x^n$, onde x é a concentração, fração molar, ou a quantidade de reagente. Assim, a expressão para a velocidade torna-se:

$$-\frac{dx}{dt} = A \exp(-E/RT) x^n \quad (\text{Eq.1.19})$$

Logaritmando e diferenciando convenientemente a equação (1.19), chegaremos a:

$$\frac{Edt}{RT^2} = d\ln\left(-\frac{dx}{dt}\right) - n \, d\ln(x) \quad (\text{Eq.1.20})$$

A integração dessa equação dá então:

$$-\frac{E}{R} \Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \Delta\ln\left(-\frac{dx}{dt}\right) - n \, \Delta\ln(x) \quad (\text{Eq.1.21})$$

Dividindo as equações (1.20) e (1.21) por $d\ln(x)$ e $D\ln(x)$, respectivamente, teremos;

$$\frac{EdT}{RT^2} \frac{1}{d\ln(x)} = \frac{d\ln(-dx/dt)}{d\ln(x)} - n \quad (\text{Eq.1.22})$$

e

$$-\frac{(E/RT)}{\Delta\ln(x)} \Delta\left(\frac{1}{T}\right) = \frac{\Delta\ln(-dx/dt)}{\Delta\ln(x)} - n \quad (\text{Eq.1.23})$$

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Os gráficos das equações (1.22) e (1.23), correlacionando $\ln(-dx/dt)/\ln(x)$ em função de $dT/[T^2\ln(x)]$ e $D\ln(-dx/dt)/D\ln(x)$ em função de $D(1/T)/D\ln(x)$, respectivamente, produzirá uma linha reta com inclinação igual a $-(E/R)$, interceptando a ordenada em n .

As aproximações por métodos integrais são também baseadas na equação (1.18), a qual pode ser rescrita na formar:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \left(\frac{A}{\phi}\right) \exp(-E/RT) dT \quad (\text{Eq.1.24})$$

Integrando a equação (1.24) temos,

$$F(\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \left(\frac{A}{\phi}\right) \int_{T_0}^T \exp(-E/RT) dT \quad (\text{Eq.1.25})$$

Um método para solução da equação (1.25), denominado de método de integração da exponencial (ABOU-SHAABAN, 1978), baseia-se na escolha arbitrária de $f(a) = (1 - a)^n$. A aproximação é feita com integração do lado direito da equação (1.25) auxiliada pela substituição de $m = E/RT$ e o uso da aproximação do tipo:

$$\int_{\mu}^{\alpha} e^{-\mu} \mu^{-b} d\mu = \mu^{(1-b)} e^{-\mu} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (b)^n}{\mu^{n+1}} \quad (\text{Eq.1.26})$$

para obter a equação:

$$\frac{1 - (1-\alpha)^{1-n}}{1-n} = \frac{ART^2}{\phi E} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) e^{-E/RT} \quad (\text{Eq.1.27})$$

Logaritmando a equação (1.27), teremos:

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2 (1-n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\phi E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (\text{Eq.1.28})$$

É um gráfico de $\ln\{[1-(1-\alpha)^{1-n}] / [T^2 (1-n)]\}$ em função de $1/T$ proporcionará uma linha reta com inclinação igual a $(-E/R)$.

3.9.2 Métodos mecânicos

Nos métodos de análise cinética que levam em conta o mecanismo da reação, a função $f(a)$ depende do tipo de mecanismo de controle da reação e do tamanho e forma da partícula reagente, o qual pode estar classificado dentro de um dos seguintes processos básicos (CARTER, 1961): a) transporte de material ou difusão; b) nucleação e crescimento dos núcleos e;c) reação na interface. Várias equações têm sido elaboradas a partir de dados experimentais para descrever esses três processos, admitindo diferentes modelos físicos-geométricos.

Entre as expressões freqüentemente utilizadas para $f(a)$, nove delas são apresentadas (SHARP,1966) onde os processos de difusão em uma única dimensão, com coeficientes de difusão constantes, têm expressões analíticas de parábolas, isto é,

$$f(\alpha) = D_1(\alpha) = \alpha^2 = \left(\frac{k}{x^2} \right) t \quad (\text{Eq.1.28})$$

sendo $2x$ e $2x_0$ respectivamente a espessura e a espessura inicial da camada reagente.

A equação que descreve uma reação com difusão controlada a duas dimensões foi proposta por HOLDT, CUTLER e WADSWORTH (1962) como:

$$f(\alpha) = D_2(\alpha) = (1 - \alpha) \ln(1 - \alpha) + \alpha = \left(\frac{k}{r^2} \right) t \quad (\text{Eq.1.29})$$

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Sendo, r é o raio da partícula reagente, para a qual se atribui uma forma cilíndrica.

A equação obtida para uma reação de difusão controlada em uma esfera, é dada por (JANDER, 1927):

$$f(\alpha) = D_3(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/2}\right]^2 = \left(\frac{k}{r^2}\right) t \quad (\text{Eq.1.30})$$

E para uma reação com difusão controlada iniciando na parte externa de uma partícula esférica de raio r , teremos conforme GINSTLING e BROUNSHTEIN (1950):

$$f(\alpha) = D_4(\alpha) = \left(1 - \frac{2\alpha}{3}\right) - (1 - \alpha)^{2/3} = \left(\frac{k}{r^2}\right) t \quad (\text{Eq.1.31})$$

Quando a reação é controlada pelo movimento da interface a uma velocidade constante u , então a equação relacionando α e t pode ser obtida para sistemas geométricos simples (VALENSI, 1950). Para uma partícula reagente, em forma de disco circular ou cilindro, tem-se:

$$f(\alpha) = R_2(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/2}\right] = \left(\frac{u}{r}\right) t \quad (\text{Eq.1.32})$$

e para uma esfera de raio r , reagindo da superfície para o centro:

$$f(\alpha) = R_3(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/3}\right] = \left(\frac{u}{r}\right) t \quad (\text{Eq.1.33})$$

Por conveniência analítica, a equação (1.13) tem sido aplicada na análise de reações do estado sólido. Para certos valores de n , a forma integrada dessa equação leva a alguns resultados particulares de interesse. Quando $n = 1/2$, chega-se à equação (1.32), enquanto que se $n = 2/3$, obtêm-se a equação (1.33).

Algumas reações no estado sólido parecem seguir o comportamento cinético de uma reação de primeira ordem, isto é, $n = 1$. A forma integrada da equação (1.13) passa então a ser:

$$f(\alpha) = \ln(1 - \alpha) = -kt \quad (\text{Eq.1.34})$$

Valores de n diferentes de $1/2$, $2/3$ e 1 , levam a equação (1.13) para formas sem nenhum significado físico.

Admite-se que o mecanismo de uma reação controlada pelo avanço da interface possui uma etapa com nucleação, a qual ocorre virtual e instantaneamente, de modo que a superfície de cada partícula é coberta por uma camada de produto. Contudo, a nucleação do reagente pode ser um processo aleatório e não ser regido por um crescimento rápido superficial. Com o aumento do número de núcleos, todavia, estes devem se aproximar de modo que eventualmente venham a tocarem-se. Este processo foi estudado por AVRAMI (1941) e EUROFE'EV (1946), os quais usaram as equações:

$$f(\alpha) = A_2(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{1/2} = kt \quad (\text{Eq.1.35})$$

e

$$f(\alpha) = A_3(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{1/3} = kt \quad (\text{Eq.1.36})$$

respectivamente.

A Tabela 1.6 resume as formas mais comumente utilizadas para $f(a)$ (SHARP, 1966):

Tabela 1.6 - Expressões matemáticas comumente usadas para $f(a)$

$f(a)$	Simbologia utilizada	Processo controlador da velocidade de reação
a^2	$D_1(a)$	Difusão unidimensional
$a + (1-a) \ln(1-a)$	$D_2(a)$	Difusão bidimensional
$[1 - (1-a)^{1/3}]^2$	$D_3(a)$	Difusão tridimensional (equação de Jander)
$1 - (2a/3) - (1-a)^{2/3}$	$D_4(a)$	Difusão tridimensional (eq. Ginstring-Brounshtein)
$1 - (1-a)^{1/2}$	$R_2(a)$	Avanço da interface bidimensional
$1 - (1-a)^{1/3}$	$R_3(a)$	Avanço da interface tridimensional
$-\ln(1-a)$	$F_1(a)$	Equação de 1ª ordem
$(-\ln(1-a))^{1/n}$	$A_n(a)$	Nucleação aleatória, $n=1$ Nucleação aleatória e posterior crescimento, eq. de Avrami-Eurofe'ev, $n=2, 3$ e 4 .

Fonte: Santos (1990)

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOU-SHAABAN, R. R. A.; SIMONELLI, A. P., Thermal Analysis of reactions and transformations in the solid state, **Thermochimica Acta**, v.26, p. 67-88, 1978.

ANGELERI, F. B.; CARDOSO, S. R. F.; SANTOS, P. S. As gipsitas brasileiras e sua aplicação como gesso na indústria cerâmica. Descrição dos métodos utilizados para seu estudo e caracterização. Parte I: Ensaio químicos. **Cerâmica**, São Paulo, v. 28, n. 156, p.471-479, dez. 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE CHAPAS PARA DRYALL. **Resíduos de gesso na construção civil: coleta, armazenagem, e destinação para reciclagem**. Emitido em: maio de 2009. Disponível em: <<http://www.drywall.org.br>>. Acesso em: 07 de dezembro de 2009.

Avrami, M. Kinetics of phase change. III. Granulations, phase change, and microstructure **J. Chem. Phys.**, v.9, p.177–184, 1941.

BALTAR, C. A. M; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. **Variedades Mineralógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso**. In.: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. Anais: Florianópolis, 2004,329 p.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; LUZ, A. B. **Gipsita**. CT2005-122-00. Rio de Janeiro: CETEM-Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005. 23 p. Comunicação Técnica.

CARTER, R. E., Kinetic model for solid-state reactions, **J. Chem. Phys**, v.34, n.6, p.2010-2015, 1961.

CAVALCANTI, L. B., **Condições Operacionais de Produção de um Gesso Beta Reciclável**. 2006, 135 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2006.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção: composição química. In: EDIFICAÇÕES IPT. **Tecnologia de edificações**. São Paulo: EDIFICAÇÕES IPT, 1988. p. 53-56.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). Oportunidades de eficiência energética para a indústria. Relatório setorial: **CAL E GESSO**. Brasília, 2010. 42p. Disponível em: <<http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/FF8080812C8533A0012C988992E84D6B/relatorio%2024%20%20Sumario%20%20Vis%C3%A3o%20institucional.pdf>>. Acesso em: 03 Junh. 2013.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução 307, 5 de Julho de 2002 Diretrizes, critérios e procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil**.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução 431, 24 de maio de 2011. **Altera o art. 3o da Resolução no 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional**

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

do Meio Ambiente - CONAMA, estabelecendo nova classificação para o gesso, de Resíduo tipo C para Resíduo tipo B. Maio, 2011.

CIWMB - California Integrated Waste Management Board. Drywall Recycling. 2013. Disponível em www.ciwmb.ca.gov/publications/condemo/43195069.doc. Acessado em: 20 de março de 2013.

EROFE' EV, B. V., Generalized equation of chemical kinetics and its application in actions involving solids, **Compt. Rend. Acad. Sei. URSS**, v.52, p.511-514, 1946.

Fogler, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 892 p., 2002.

GINSTLING, A. M.; BROUNSHTEIN, B. I., Concerning the diffusion kinetics of reactions in spherical particles, **J. Appl. Chem. USSR**, v.23, n.12, p.1227-1338, 1950.

GOMES, W., Definition of rate constant and activation energy in solid-state reaction, **Nature**, v.192, n.2, p.865-866, dec. 1961.

GOURDIN, W. H.; KINGERY, W. D. The beginnings of pyrotechnology: neolithic and egyptian lime plaster. **Journal of Field Archaeology**, Boston, v. 2, n. 1, p.133-150, 1975. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/529624>>. Acesso em: 19 maio 2009.

HENRIQUES JR. M. F.; **Potencial de financiamento de eficiência energética: nos setores de cerâmica e gesso no nordeste**. Instituto Nacional de Tecnologia – INT / MCTI, 2013.

HOLD, B. J.; CUTLER, I. B.; WADSWORTH, M. E., Rate of thermal dehydration of kaolinite in vacuum, **J. Am. Chem. Soc.**, v.45, n.3, p.133-136, 1962.

HOROWITZ, H. H.; GERSHON, M., A new analysis of thermogravimetric traces, **Analytical Chemistry**, v.35, n.10, p.1464-1468, set. 1963.

JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Gesso de construção civil. In: ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil**. São Paulo: Ibracon, 2007. p. 727-760.

KANNO, W. M. **Propriedades mecânicas do gesso de alto desempenho**. Tese de Doutorado. 130p. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciências e Engenharia dos Materiais. Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2009.

LINHALES, F. **Caracterização do gesso**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. 2003.

LUZ, A.B.; BALTAR, C.A.M.; FREITAS, E.J.G. de; SILVA, A.P- da - **Gesso – Mineração São Jorge- In.: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil**, CETEM-MCT, Rio de Janeiro, 2001. p. 240-249.

LEVENSPIEL, O., Engenharia das reações químicas, Tradução Editora Edgard Blücher Ltda., v. 1, São Paulo, 1974.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

MATEUS, N. B. **O delineamento composto central e sua viabilidade de uso em algumas áreas de pesquisa.** 98 p. 2001. Dissertação de (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MONÇÃO JÚNIOR, A. R. **Otimização das condições experimentais na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável.** 2007, 98 f. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2008.

NINAN, K.N. Kinetics of solid state thermal decomposition. **Journal of Thermal Analysis**, v. 35, p.1267-1278, 1989.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O gesso – produção e utilização na construção civil.** Recife: Bagaço, 2001. 94 p.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **O gesso – produção e utilização na construção civil.** Recife: Sebrae, 2008. 120 p.

JANDER, W., Reactions in the solid state at high temperatures, Z. **Anorg. Allgem. Chem.**, v.163 n.1-2 , p.1-30, 1927.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos:** uma estratégia sequencial de planejamento. 1 ed. Campinas: casa do Pão Editora, 2005. 207 p.

SOBRINHO, C. P. de L.; AMARAL, A. J. R. do; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A.; **Gipsita.** Economia Mineral do Brasil - 2009: Disponível em:<https://sistemas.dnrm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=4009>. Acesso em: 20 Jun. 2012.

SOBRINHO, C. P. de L.; AMARAL, A. J. R. do; DANTAS, J. O. C.; DANTAS, J. R. A.; **Gipsita.** Balanço Mineral 2001. Disponível em: <<http://www.dnrm.gov.br/assets/galeriadocumento/balancomineral2001/gipsita.pdf>>. Acesso em: 19 Jun. 2012.

SANTOS, V. A., Análise cinética da reação de desidratação térmica da gipsita na obtenção do gesso beta. **Tese de Doutorado.** Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos e Informática. Universidade Estadual de Campinas. Campinas: 1996. 170 p.

SHARP, J. H.; BRINDLEY, G. W.; ACHAR, B. N. N., Numerical data for some commonly used solid state reactions equations, **Journal of the American Ceramic Society**, v.49, n. 7, p.379-382, 1966.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO GESSO DO ESTADO DE PERNAMBUCO – SINDUSGESSO (Brasil). Consumo de gesso no Brasil. Assessoria de imprensa, 9 maio 2007. Disponível em: <http://www.sindusgesso.org.br/noticias_informativo.asp?codigo=14>. Acesso em: 03 Mai. 2013.

VALENSI, G., Analysis of the methods of interpreting reactions of a gas with a solid to form another solid, **J. Chim. Phys.**, v.47 , p.487-505,1950.

WENDLANDT, W. W., **Thermal Methods of Analysis**, 3rd ed., J. Wiley, N. York, 1986.

CAPÍTULO 2

ARTIGO SUBMETIDO PARA PUBLICAÇÃO NA REVISTA POWDER TECHNOLOGY

Otimização da Produção de Gesso Beta Reciclável Utilizando Resíduos de Gesso em Reator Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Otimização da Produção de Gesso Beta Reciclável Utilizando Resíduos de Gesso em Reator Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

Mendonça, R. S.^a; Santos, L.B.^b; Moura, A.E.^c; Sarubbo, L.A.^{a,*}; Vasconcelos, E.C.^b;
Santos, V. A.^a.

^a Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil

^b Padrão Gypsum, Araripina, Pernambuco, Brasil

^c Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil

* Endereço de correspondência para autor. Tel.: +55 81 21194084; fax: +55 81 21194000. E-mail address: leonie@unicap.br (L. Sarubbo)

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Resumo: Foram realizados experimentos para investigar condições operacionais otimizadas para a produção de gesso reciclável a partir de resíduos de gesso originários da construção e demolição (RCD) ou da indústria de pré-moldados, em um forno contínuo de elemento móvel helicoidal em escala de bancada. Foi aplicado um planejamento experimental do tipo delineamento composto central rotacional (DCCR) de 2^2 , cujos fatores foram: temperatura média de reação, entre 148 °C e 162 °C, e pressão manométrica, de 0,2 a 0,8 bar, após definição de uma granulometria que conferisse às condições da reação a isenção de efeitos difusivos. A análise estatística dos resultados, baseada na metodologia de superfície de resposta (SRM), permitiu a identificação de condições operacionais otimizadas para 162,4 °C e 0,5 bar. Com essas condições de produção definidas foi testada e aprovada a equação de Avrami-Eurofe'ev, com $n=2$, para a cinética de desidratação térmica do referido processo.

Palavras-chave: Agitador helicoidal; Desidratação térmica; Avrami-Eurofe'ev; Gesso beta reciclável.

1. INTRODUÇÃO

Foram as grandes catástrofes do século passado, como terremotos e guerras, que impulsionaram a prática da reciclagem em locais com grandes volumes de resíduos, carência e urgência de construções e infraestrutura. Durante e após a Segunda Guerra Mundial, foram reciclados aproximadamente 115 milhões de m^3 de resíduos de construção e demolição na Alemanha, os quais foram utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais [1]. Entretanto, nas últimas décadas, principalmente por razões ambientais e econômicas, vários países vêm adotando a reciclagem, realizada por empresas de diversos segmentos. Outros motivos contribuíram para a recuperação dos resíduos, principalmente nessas últimas décadas: exploração exagerada de jazidas de agregados, disposição dos resíduos sem tratamento, geração de um volume maior de entulho do que a construção de estradas pode absorver e sobrecarga de aterros [2].

Alguns benefícios gerados pela reciclagem na construção civil consistem principalmente nas reduções de: consumo de recursos naturais não-renováveis, áreas necessárias para aterro, volume de resíduos gerados pela reciclagem, consumo de energia durante processos de produtivos e, finalmente, poluição [3]. Em alguns países a principal ênfase comercial na reciclagem desses entulhos tem sido a instalação de máquinas argamassadeiras, em canteiros de obras, para triturar os seus próprios resíduos. Esse método de produção de argamassas, apesar de aparentemente poder trazer benefícios econômicos às construtoras, apresenta problemas por falta de planejamento e de conhecimento do assunto por parte dos engenheiros. Em muitos casos, os canteiros de

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

obras não dispõem de espaço suficiente para instalação da máquina e armazenamento do entulho, que varia com o tamanho da obra. Não existe uma gestão racional do resíduo gerado que reduza, ao mínimo, os gastos com reciclagem e evite a contaminação do entulho a ser reciclado por materiais indesejáveis (aço, gesso, plástico, madeira e outros que possam inviabilizar a reciclagem) [4].

No caso de resíduos de gesso, países do primeiro mundo afirmam utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho, sendo uma tecnologia já comprovada no mercado externo [5]. Esses modelos de reutilização são válidos para os entulhos homogêneos das indústrias gesseiras, já que o resíduo é oriundo da sobra da moldagem, correm poucos riscos de serem contaminados por agentes físicos. No caso de entulho contaminado por agentes físicos existe a necessidade de usinas de reciclagem [6]. Contudo, tem sido possível a produção de gessos recicláveis com recuperação próxima de 100 % do resíduo da indústria de pré-moldados de gesso [7].

A dificuldade para total domínio da tecnologia de aproveitamento de resíduos de gesso passa pela complexidade das reações heterogêneas, que em sua grande maioria, não depende apenas da concentração e temperatura, mas também de processos difusionais, transferência de calor e área de contato entre os reagentes (sólido-sólido, sólido-fluido). Tal dependência impede que se possa prever teoricamente os comportamentos cinéticos da maioria dessas reações, sendo necessária a realização de experimentos para propor um modelo cinético ou comparar o comportamento da reação a modelos existentes [8] – [12].

Além da produção de material reciclável precisa-se substituir o uso do minério gipsita *in natura*, para produção de gesso, pela prática de reaproveitamento de resíduos de pré-moldados, fazendo com que as reservas desse minério sejam preservadas, ou sejam utilizadas da maneira o mais racional possível. Dessa forma, existe uma necessidade premente de se desenvolver, desde a escala de laboratório, equipamentos que permitam a identificação de mecanismos cinéticos e facilitem o acompanhamento de experimentos em diferentes escalas [13]. Isso permitirá que se chegue a adequadas correlações de scale-up, e que se defina, desde cedo, condições otimizadas para um o processo, ambientalmente amigável.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

O forno reator piloto desenvolvido neste trabalho para a produção de gesso beta reciclável, a partir de resíduos da indústria de pré-moldados, ou da construção e demolição devidamente preparados, é apresentado esquematicamente na Figura 1. Os resíduos de pré-moldados de gesso alimentam o forno através de uma tremonha (1), sendo transportados de forma contínua, através de uma câmara de desidratação térmica (2), em forma de uma calha em "U", semelhante a um transportador do tipo parafuso (3). Esse helicóide é acionado por um motor elétrico acoplado a um redutor de velocidade (4), controlado com auxílio de um inversor de frequência. A câmara de calcinação, é também um termo utilizado por técnicos da indústria gesseira para designar o local de desidratação térmica. Próximo à zona de saída da câmara de calcinação essa câmara toma um formato do tipo tronco de cone (5), para promover uma espécie de selo. Com isso evita-se o escapamento de vapor d'água resultante da desidratação térmica dos resíduos e facilita-se a manutenção de uma dada pressão. Um cilindro (6) com diâmetro igual ao da base menor do tronco de cone, complementa a extensão da câmara de calcinação e a selagem da pressão no reator. Na extremidade desse cilindro situa-se a saída (7) do gesso reciclável produzido.

O aquecimento do forno foi obtido com auxílio da passagem de corrente elétrica por resistores (8). A câmara de desidratação do forno e o helicóide foram construídos em aço inoxidável AISI 314. Todo o conjunto é suportado por uma estrutura em aço carbono (9), mais precisamente confeccionada com cantoneiras do tipo L de 1 polegada. O diâmetro interno da câmara de reação é de 0,2 m, com 1,0 m de comprimento e com capacidade para processar 50 kg/h de resíduo de gesso. Ao longo do comprimento axial da câmara de desidratação foram instalados sensores de temperatura (10) e pressão (11). A Figura 2 apresenta uma fotografia do forno piloto helicoidal.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

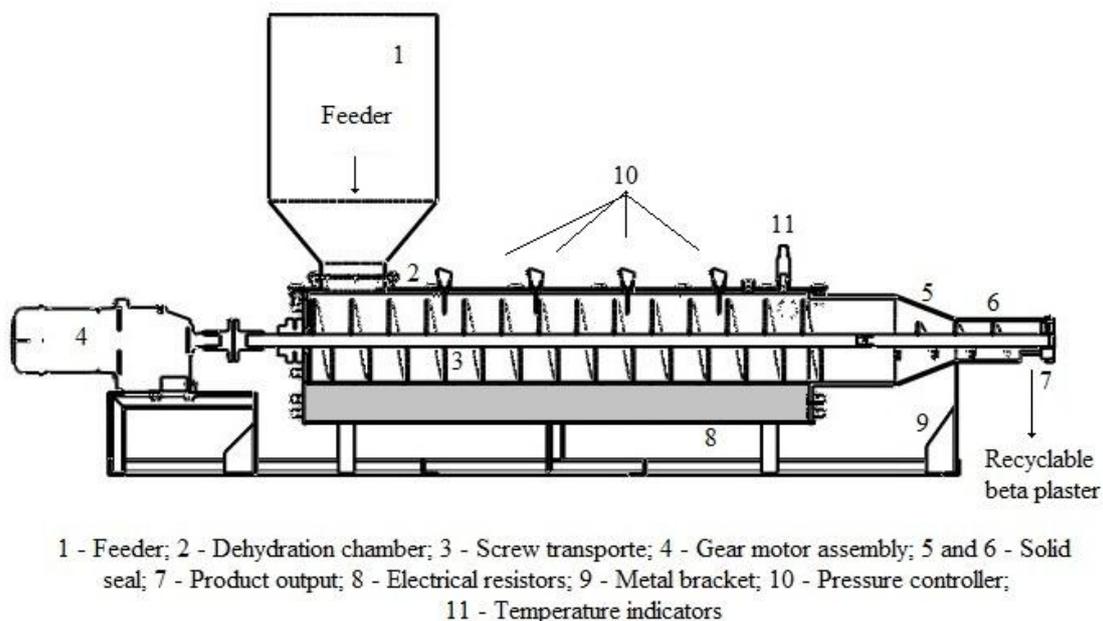


Figura 1 – Esquema com componentes do forno contínuo piloto de elemento móvel helicoidal



Figura 2 – Fotografia do forno contínuo de elemento móvel helicoidal

2.2 Resíduos de Placas de Gesso

Os resíduos de gesso utilizados nas corridas para o presente trabalho foram identificados como resíduos da fabricação de pré-moldados do tipo placas de revestimento de tetos e blocos de divisórias, reutilizados após três ciclos de vida conforme [14]. Esse material foi analisado quimicamente e sua composição é mostrada pela Tabela 1. A referida tabela mostra que a composição química média do resíduo de placa de gesso,

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

demonstra grande semelhança química com a composição média do minério gipsita que deu origem ao primeiro.

Tabela 1 – Composição química do resíduo obtidos de placas de gesso

Oxides/elements	Chemical Compositions (wt%)	
	Waste plasterboard	Gypsum ore
Umidity (50°C)	6.01	0.06
Combined water (200°C)	19.68	19.1
SiO ₂	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.10	0.00
CaO	31.00	32.58
MgO	0.00	0.03
CO ₂	0.00	1.73
MnO	0.00	0.00
SO ₃	43.21	46.54

Os resíduos de placas de gesso foram triturados e tiveram sua granulometria testada para identificação de tamanhos das partículas, a partir dos quais os efeitos da difusão podiam ser desprezados, predominando a etapa química para a reação de desidratação térmica. A conversão da reação de desidratação térmica do resíduo foi calculada com auxílio de uma balança térmica que usa a técnica de infravermelho para quantificação da água de hidratação em amostras de gesso, marca GEHAKA IV, modelo 2000.

A análise do comportamento da conversão dos resíduos em gesso beta, mostrada pelo gráfico da Figura 3, foi realizada sob pressão de 0,5 bar e a 140 °C. A referida figura apresenta os efeitos do diâmetro médio das partículas de resíduos de gesso hidratado em relação à conversão da reação. Observa-se a partir do gráfico da referida figura que a partir de um diâmetro médio igual ou inferior a 220 µm, a conversão do resíduo torna-se independente das dimensões das partículas, caracterizando assim as condições de obtenção do regime químico, como efeito controlador da velocidade global de obtenção do semi-hidrato beta.

Mendonça, R. S. Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

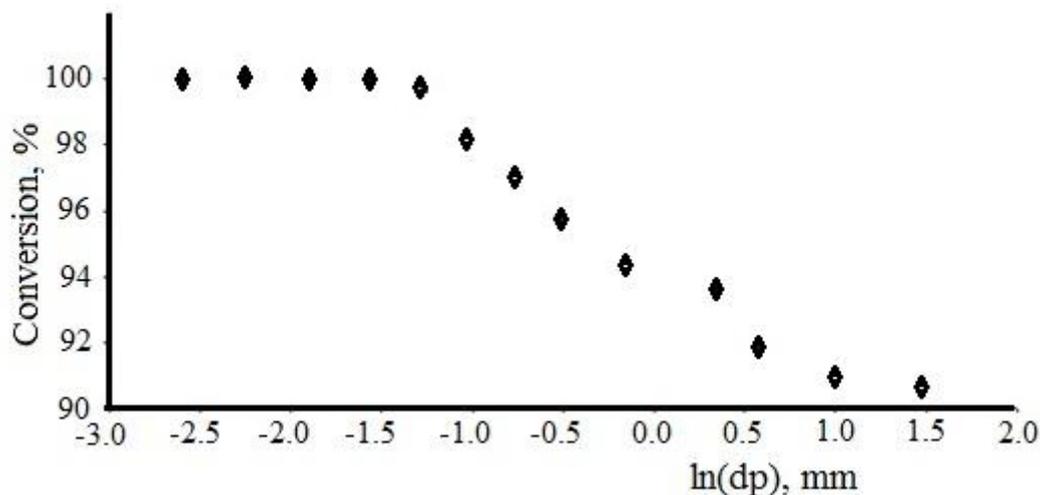


Figura 3 – Gráfico do comportamento da conversão da reação de desidratação térmica em função da granulometria das partículas do resíduo de placas de gesso

2.3 Planejamento dos Experimentos

A metodologia das superfícies de resposta consiste em um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos para a realização de um estudo empírico das relações entre as variáveis independentes, também denominadas de fatores, e as variáveis dependentes, ou variáveis resposta [15]. Pode ainda ser entendida como uma combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização.

O planejamento de experimento é a base para obtenção de um modelo responsável pela descrição da variável resposta em função de intervalos percorridos por esses fatores. Essa função é então denominada de superfície de resposta e esse modelo resultante é utilizado na previsão desse novo produto ou processo desenvolvidos. A metodologia de superfície de resposta é do tipo sequencial, ou seja, quando se está longe de ponto ótimo que se deseja determinar, um modelo de primeira ordem ajusta-se bem aos dados experimentais [16]. Contudo, quando o ponto ótimo é o alvo principal da pesquisa, um modelo de segunda ordem deve ser adotado recaindo-se dessa forma na escolha de um delineamento composto central, o qual deve ser utilizado quando se quer verificar a curvatura num plano (ponto de máximo ou de mínimo); quando se deseja verificar a existência de termos quadráticos no modelo de regressão.

Um planejamento composto central rotacional (DCCR) consiste em uma parte referente ao planejamento fatorial 2^k , $2k$ corridas axiais ou estrela e n_C corridas centrais ($n_C \geq 4$). A utilização dessa técnica permite [17]:

- Determinar quais variáveis são mais influentes no resultado;
- Atribuir valores às variáveis influentes de modo a otimizar a resposta média;
- Atribuir valores às variáveis influentes de modo a minimizar a variabilidade dos resultados.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

A construção do modelo se dá através da análise de regressão múltipla, onde é realizada a estimação dos coeficientes das variáveis de regressão. É recomendada a adoção de um Modelo de Regressão Quadrático completo, como sugere a equação [16]:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} \cdot X_i^2, \text{ onde } \beta_{ij} = \beta_{ji}.$$

Esse delineamento é utilizado para experimentos onde k (fatores) ≥ 2 . Contém pontos da parte cúbica codificados para (± 1) , pontos axiais codificados para $(\pm \alpha)$, onde $\alpha = (2^k)^{1/4}$ para testar o modelo de segunda ordem e o ponto central codificado para (0) que geralmente possui repetições.

Os resultados obtidos na desidratação térmica dos resíduos de pré-moldados de gesso foram analisados com auxílio do *software* STATISTICA (v. 12.0) onde foi realizada uma estimativa dos efeitos das variáveis e suas interações sobre a resposta analisada, considerando o nível de significância de 5%. Executou-se também a análise de variância (ANOVA) que tem como objetivo testar a validade de um modelo matemático de previsão, através do teste F e do cálculo do coeficiente da variância explicada do modelo. A metodologia de superfície de resposta foi usada para otimizar as condições de produção e fornecer um modelo matemático adequado para as respostas. Modelos obtidos com baixos valores de R^2 são desconsiderados para fins de otimização, servindo apenas para atestar a influência das variáveis sobre a resposta [15].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando analisar a influência dos fatores sobre a conversão dos resíduos de placas de gesso em gesso beta reciclável, foi realizado um DCCR do tipo 2^2 , no qual foram testadas as variáveis independentes: pressão manométrica (bar) e a temperatura correspondente ($^{\circ}\text{C}$), ambas como condições operacionais da câmara de calcinação. Os referidos fatores variaram conforme os níveis apresentados pela Tabela 1, compreendendo um total de 12 experimentos assim distribuídos: 4 pontos fatoriais completos, 4 pontos centrais e 4 pontos axiais [17].

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Tabela 2 - Real and coded values (+ higher level, 0 intermediate, - lower level) for the independent variables in the CCRD (22) for thermal dehydration of residues of plasterboard

Factor	Level				
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
X ₁ - Gauge Pressure, bar	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
X ₂ - Temperature, °C	148	150	155	160	162

Foram observadas como variáveis respostas os seguintes parâmetros: massa unitária, em kg/m³, resistência à compressão, em Mpa, e dureza Shore, em MPa. Após cada corrida de 60 minutos, os dados experimentais foram registrados e submetidos a análises segundo critérios da metodologia de superfície de resposta como proposta por [16].

As condições de operação utilizadas garantiram uma conversão mínima de 90%, valor adequado para a prática em processos comerciais. A Tabela 2 revela um comportamento semelhante para as três variáveis respostas (Massa Unitária – UM; Resistência à compressão - RS e; Dureza Shore – DS). Os valores máximos dessas propriedades do gesso produzido ocorreram nas proximidades dos pontos centrais do planejamento, evidenciando uma boa escolha de valores para as faixas de variação das condições experimentais adotadas. As condições experimentais adequadas à produção do semi-hidrato foram confirmadas com auxílio de imagens obtidas de um microscópio de varredura eletrônica conforme a Figura 5.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

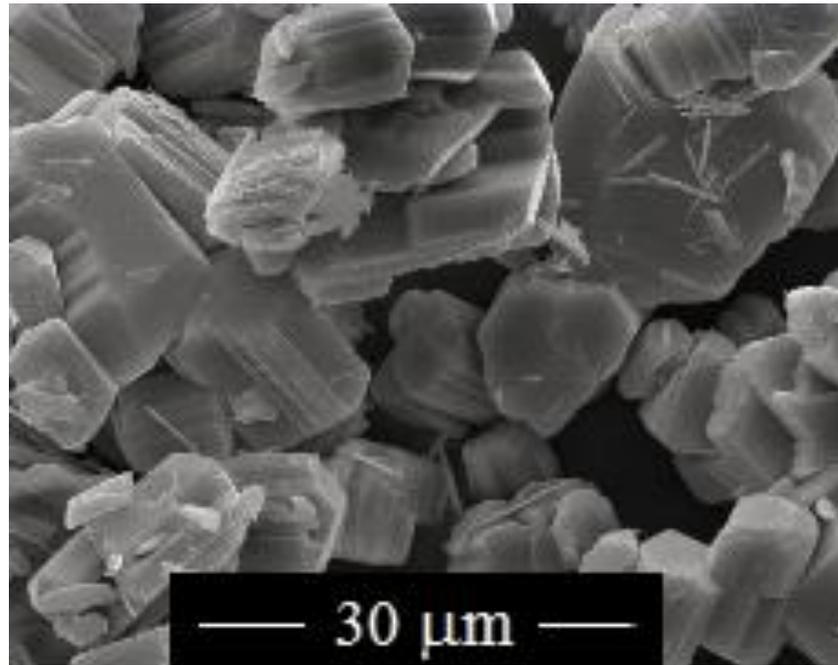


Figura 4 - Micrografia MEV de gesso beta produzido pelo forno contínuo helicoidal

Tabela 3 - Matrix of CCRD (2^2) with independent variables and response values for thermal dehydration of residues of plasterboard

Número	Fator		Variáveis dependentes		
	Gauge Pressure X_1	Temperature X_2	Unitary mass (kg/m^3) Y_1	Compressive Strength (MPa) Y_2	Shore hardness (MPa) Y_3
1	0.3(-1)	150(-1)	734	17.10	53.53
2	0.3(-1)	160(+1)	755	15.32	47.33
3	0.7(+1)	150(-1)	842	24.00	68.59
4	0.7(+1)	160(+1)	800	20.10	61.00
5	0.2(-1.41)	0	760	17.09	48.08
6	0.8(+1.41)	0	822	24.10	65.41
7	0.5(0)	148(-1.41)	800	23.00	62.03
8	0.5(0)	162(+1.41)	751	19.50	57.12
9	0.5(0)	155(0)	866	27.00	74.00
10	0.5(0)	155(0)	860	26.50	75.07
11	0.5(0)	155(0)	865	25.98	73.81
12	0.5(0)	155(0)	860	26.30	73.80

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

Através da análise de variância, pelo teste F, comparando-se o valor do F calculado com o F tabelado é possível afirmar se os modelos de previsão, obtidos pelos ajustes destes aos dados experimentais são válidos. As Tabelas de 3, 4 e 5 apresentam resultados da ANOVA para as variáveis resposta massa unitária, resistência à compressão e dureza Shore, respectivamente, além dos valores das razões entre F calculado e F tabelado para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4 - Variance analysis for validation of mass unitary predictive model

Fator	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	p - value
X ₁ (L)	7,240.93	1	7,240.93	69.75	0.000117
X ₁ (Q)	8,294.40	1	8,294.40	79.90	0.000095
X ₂ (L)	1,019.18	1	1,019.18	9.82	0.002146
X ₂ (Q)	12,250.00	1	12,250.00	118.00	0.000053
X ₁ · X ₂	992.25	1	992.25	9.56	0.002232
Lack of fit	825.39	3	275.13	2.89	0.011431
Pure error	30,75	3	10.25	-	-
Total	27,308.92	11	-	-	-

R² = 0.9687 (96.87 % da variabilidade total dos dados pode ser explicada pelo modelo de regressão)

Tabela 5 - Variance analysis for validation of compressive strength predictive model

Fator	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	P - value
X ₁ (L)	58.2856	1	58.28565	31.48	0.000383
X ₁ (Q)	72.8190	1	72.81902	39.43	0.000275
X ₂ (L)	14.1239	1	14.12394	7.63	0.003101
X ₂ (Q)	59.3653	1	59.36532	32.07	0.000373
X ₁ · X ₂	1.1236	1	1.12360	0.607	0.089313
Lack of fit	6.8828	3	2.29426	1.35	0.033262
Pure error	0.5483	3	0.18277	-	-
Total	191.2609	11	-	-	-

R² = 0.9611 (96.11 % da variabilidade total dos dados pode ser explicada pelo modelo de regressão)

Tabela 6 - Variance analysis for validation of Shore Hardness predictive model

Factor	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	p - value
X ₁ (L)	354.290	1	354.2899	94.94	0.000074
X ₁ (Q)	501.193	1	501.1932	134.30	0000044
X ₂ (L)	53.736	1	53.7362	14.40	0.001222
X ₂ (Q)	353.728	1	353.7276	94.79	0.000074
X ₁ · X ₂	0.483	1	0.4830	0.13	0.335295
Lack of fit	8.686	3	2.8954	0.85	0.062168
Pure error	1.105	3	0.3685	-	-
Total	1,133.404	11	-	-	-

$R^2 = 0.9914$ (99.14 % da variabilidade total dos dados pode ser explicada pelo modelo de regressão)

Com base na Tabela 7, os valores das razões entre F tabelado e F calculado para os termos de falta de ajuste, menores que 4 e, excelentes valores dos coeficientes de determinação (R^2), indicam que os modelos, Equações de (2) a (4), ajustam-se aos pontos experimentais e são adequados [18].

Os modelos codificados propostos para representarem as variáveis respostas estudadas foram:

$$UM(\text{kg/m}^3) = -42352 + 3492 \cdot P - 900 \cdot P^2 + 548 \cdot T - 1,8 \cdot T^2 - 15,7 \cdot P \cdot T \quad (2)$$

$$CE(\text{MPa}) = -2928 + 180 \cdot P - 84,3 \cdot P^2 + 37,8 \cdot T - 0,1 \cdot T^2 - 0,5 \cdot P \cdot T \quad (3)$$

$$SH(\text{MPa}) = -2928 + 180 \cdot P - 84,3 \cdot P^2 + 37,8 \cdot T - 0,1 \cdot T^2 - 0,5 \cdot P \cdot T \quad (4)$$

De posse dos modelos de previsão (Equações de 2 a 4), o programa Statistica forneceu ainda gráficos tridimensionais para as variáveis resposta, em função da temperatura e da pressão de trabalho, de acordo com as Figuras de 6 a 8. Os gráficos dessas figuras ilustram os comportamentos das variáveis massa unitária, resistência à compressão e dureza Shore, como função das variáveis independentes pressão e temperatura na câmara de desidratação do forno. O software STATISTICA permitiu a sintetização das condições otimizadas de trabalho, indicadas com auxílio das referidas figuras.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

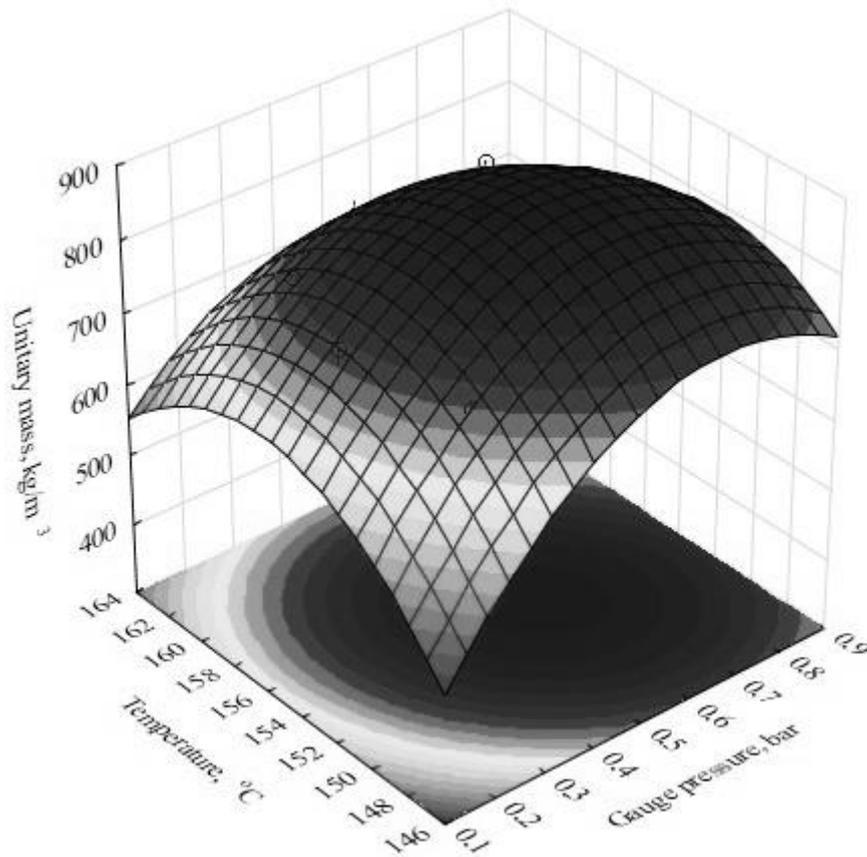


Figura 5 - Response surface of unitary mass in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

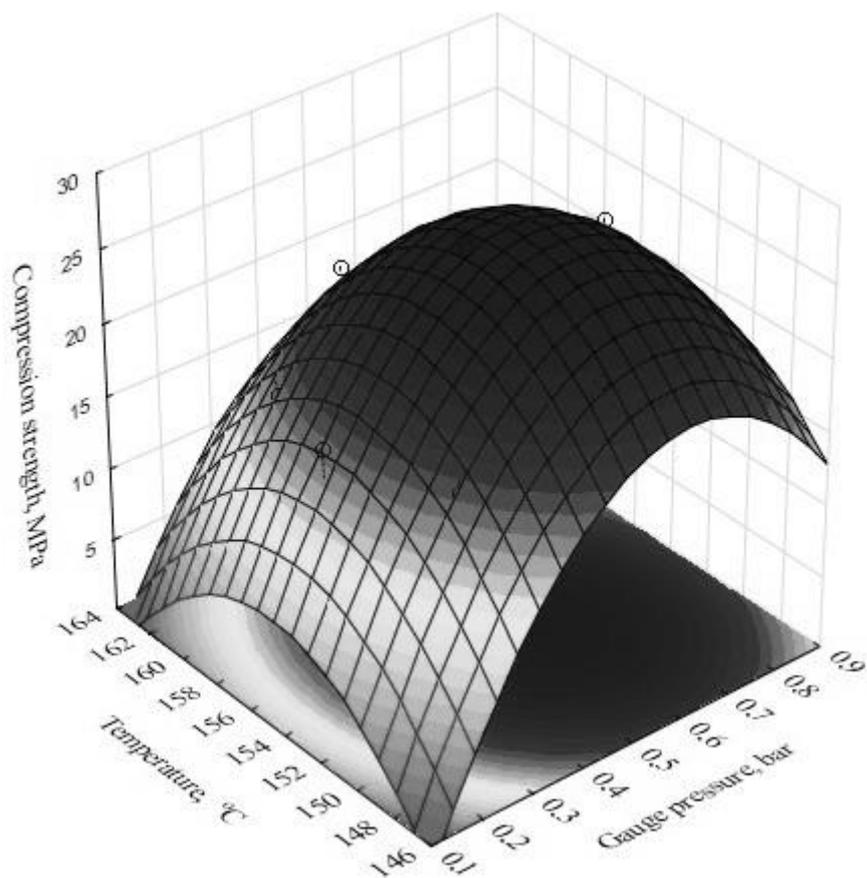


Figura 6 - Response surface of compression strength in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues

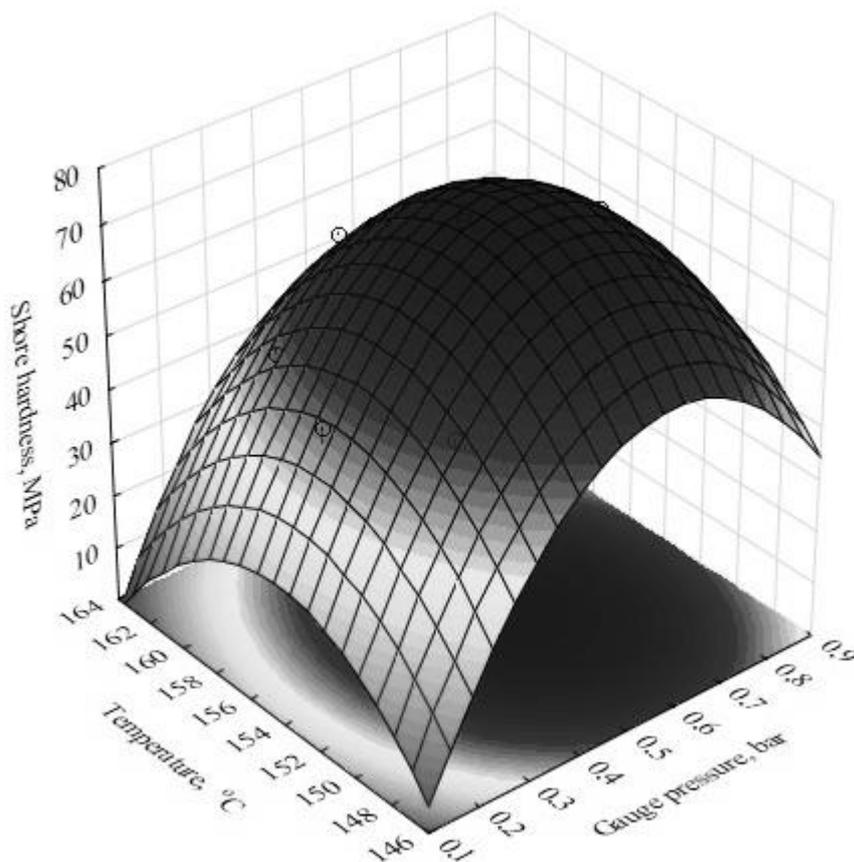


Figura 7 - Response surface of Shore hardness in function of temperature and gauge pressure for the thermal dehydration of plasterboard residues

Quando se tem mais que uma variável de resposta, geralmente se está interessado em encontrar as condições operacionais ótimas dos fatores que satisfaçam simultaneamente todos os requisitos necessários às variáveis dependentes. Essa condição operacional pode ser encontrada com o auxílio de uma técnica de otimização com restrições, com base em programação não linear [19]. O software STATISTICA converte cada resposta y_i em uma função individual (desirability – d_i), variando como $0 \leq d_i \leq 1$. Caso a resposta alvo seja a desejada, $d_i = 1$ e, caso a resposta alvo esteja fora da região da qual se deseja, $d_i = 0$. Dessa forma, os fatores são escolhidos de modo a maximizarem a desirability global [20].

Com o objetivo de se obter os fatores exatamente nos valores ótimos utilizou-se o STATISTICA para realizar a otimização, com restrições, das variáveis respostas. Para isso utilizou-se o menu *Means* e dentro deste a opção *Response desirability profiling*. A Figura 9 mostra os valores dos pontos ótimos das 3 variáveis de resposta – massa unitária = 866 kg/L - resistência à compressão = 27 MPa – dureza Shore = 75.1 MPa, e as condições operacionais que levam ao ótimo das respostas foram: temperatura = 162.7 °C e pressão manométrica = 0.5 bar. A função *desirability* global foi igual a 0.995. A Figura 8 ilustra a referida função desirability global obtida. A Figura 10 ilustra a superfície de resposta relativa à referida função.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

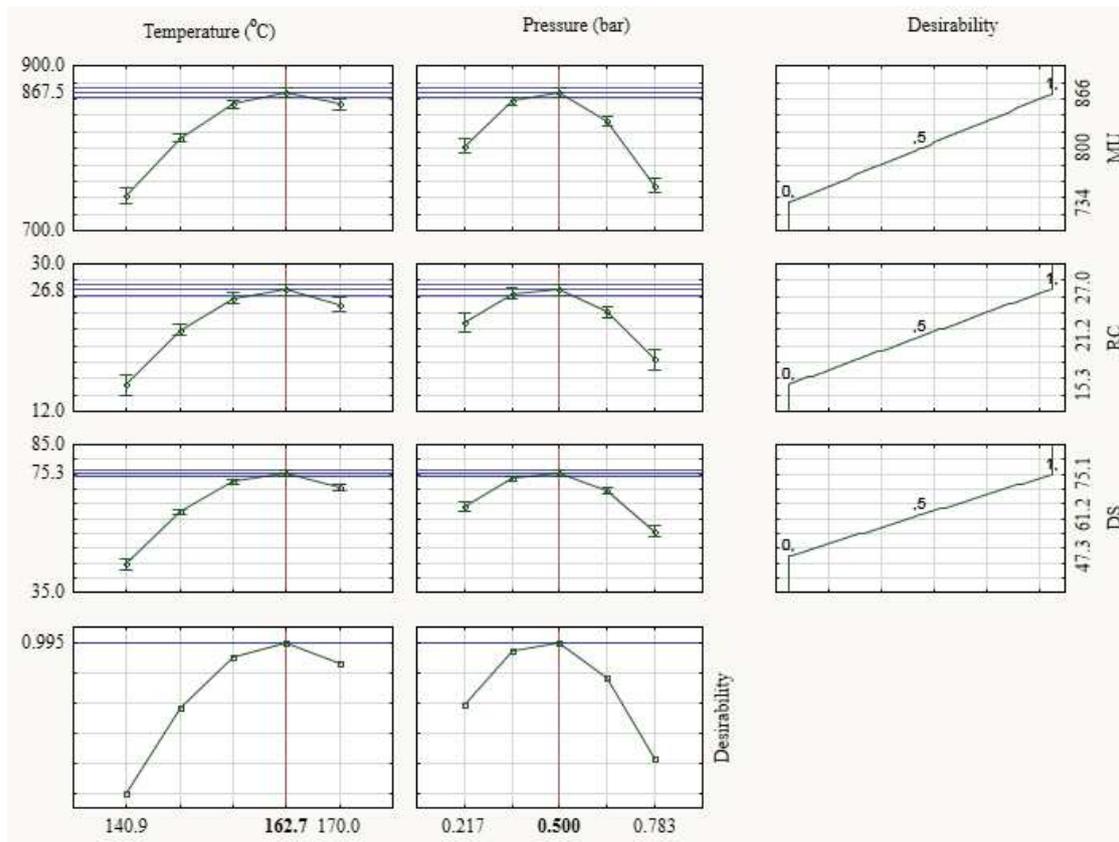


Figura 8- Desirability function for optimal conditions of the plasterboard residues thermal dehydration

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

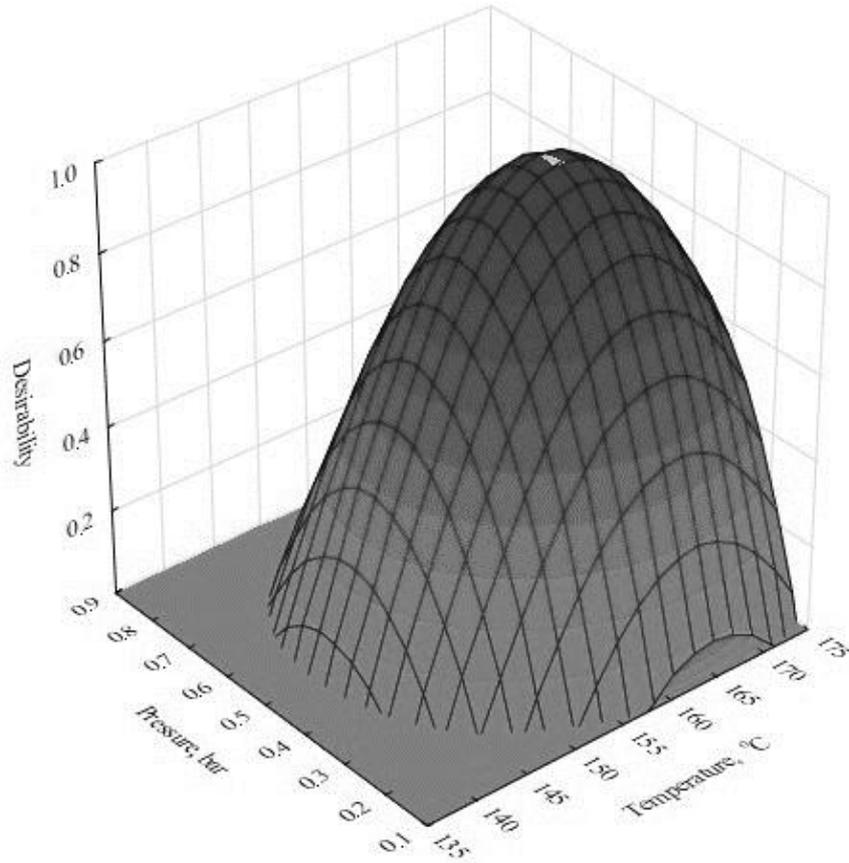


Figura 9 - Plot of the Desirability global function for optimal conditions of the plasterboard residues thermal dehydration

Definidas as condições otimizadas de temperatura e pressão para a desidratação térmica dos resíduos de pré-moldados de gesso, foi obtida uma curva isotérmica do comportamento da conversão (α) desse resíduo em gesso reciclável, em função do tempo. Para se manter as condições operacionais otimizadas do forno a rotação do equipamento foi mantida em 0.04 rpm, obtendo-se um tempo de residência médio para os resíduos da ordem de 60 minutos; o que correspondeu a uma produção média de 50 kg de gesso por hora. O fator de correção de volume (λ) para os resíduos de placas de gesso, calculado para o transporte pelo helicóide do forno foi de 0.4. A Figura 11 ilustra o comportamento da conversão com o tempo de reação de desidratação térmica a 0.5 bar e 162.7 °C. A equação de regressão e ajuste de um polinômio de terceira ordem aos dados experimentais é apresentada pela Equação (5), para uma variância explicada de 99,72 % [21]:

$$\alpha = -22.8167 + 3.0089 \cdot t + 0.0176 \cdot t^2 - 0.0006 \cdot t^3 \quad (5)$$

Em que:

α – conversão percentual dos resíduos de pré-moldados de gesso em gesso beta reciclável, %

t – tempo de reação, min

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

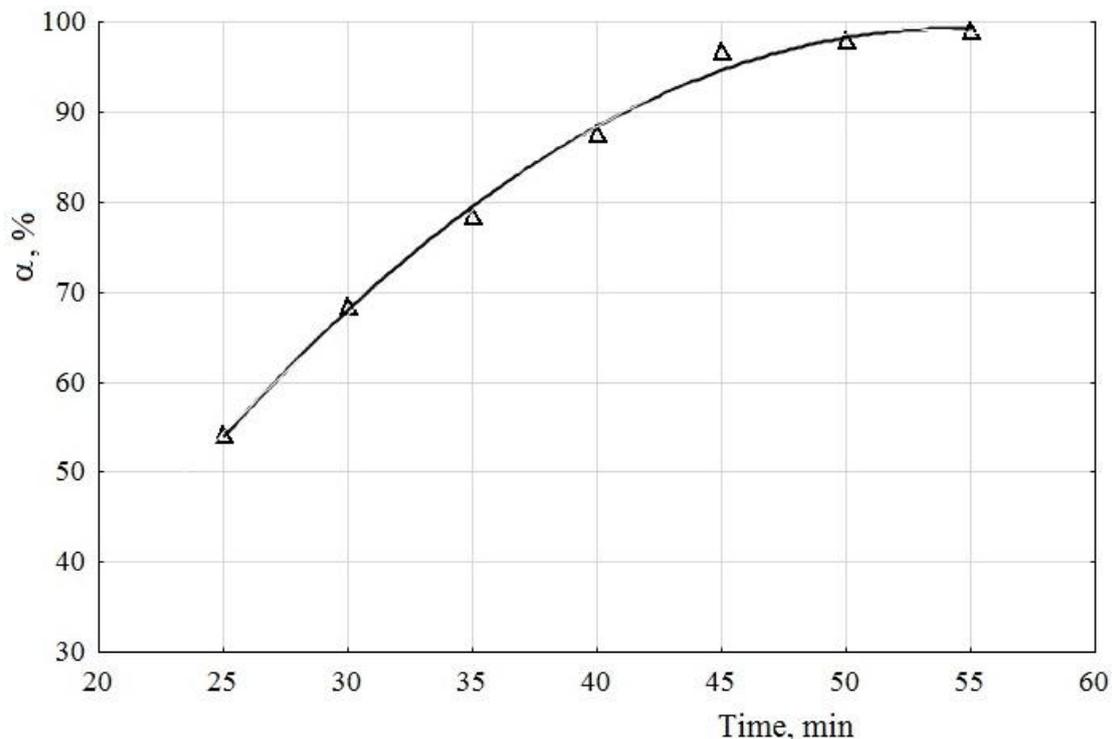


Figura 10 - Conversion of thermal dehydration for plasterboard residues in function of reaction time in a helical mobile element reactor

A análise isotérmica dos dados experimentais para as condições otimizadas do forno utilizado neste trabalho mostrou que a conversão dos resíduos deu origem a ajustes de pouca convergência para a maioria dos modelos existentes na literatura, com especial concordância à equação de Avrami-Eurofe'ev [22]. Neste caso foi obtida uma variância explicada de 98,73% para o ajuste dos dados quando n assumiu o valor de 2. Daí o modelo cinético adotado para a desidratação térmica dos resíduos foi:

$$\alpha = 1 - \left(e^{-k^n \cdot t^n} \right) \quad (6)$$

Em que k é a constante de velocidade e n é o parâmetro responsável pela descrição do mecanismo da reação, sendo $n=2$. A Figura 12 ilustra o comportamento da fração convertida de resíduo (α) em função do tempo de reação. Esse tipo de modelo de mecanismo de reação prevê que é quase impossível manter uma taxa de reação acelerada durante toda a sua extensão. À medida em que os núcleos do produto começam a crescer, impedem que sítios de nucleação em potencial gerem novos núcleos, fenômeno

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

conhecido como ingestão [22]. Além disso, a área de contato núcleo-reagente diminui quando dois núcleos crescem até se tocarem, o que é conhecido como coalescência, diminuindo assim a velocidade da reação.

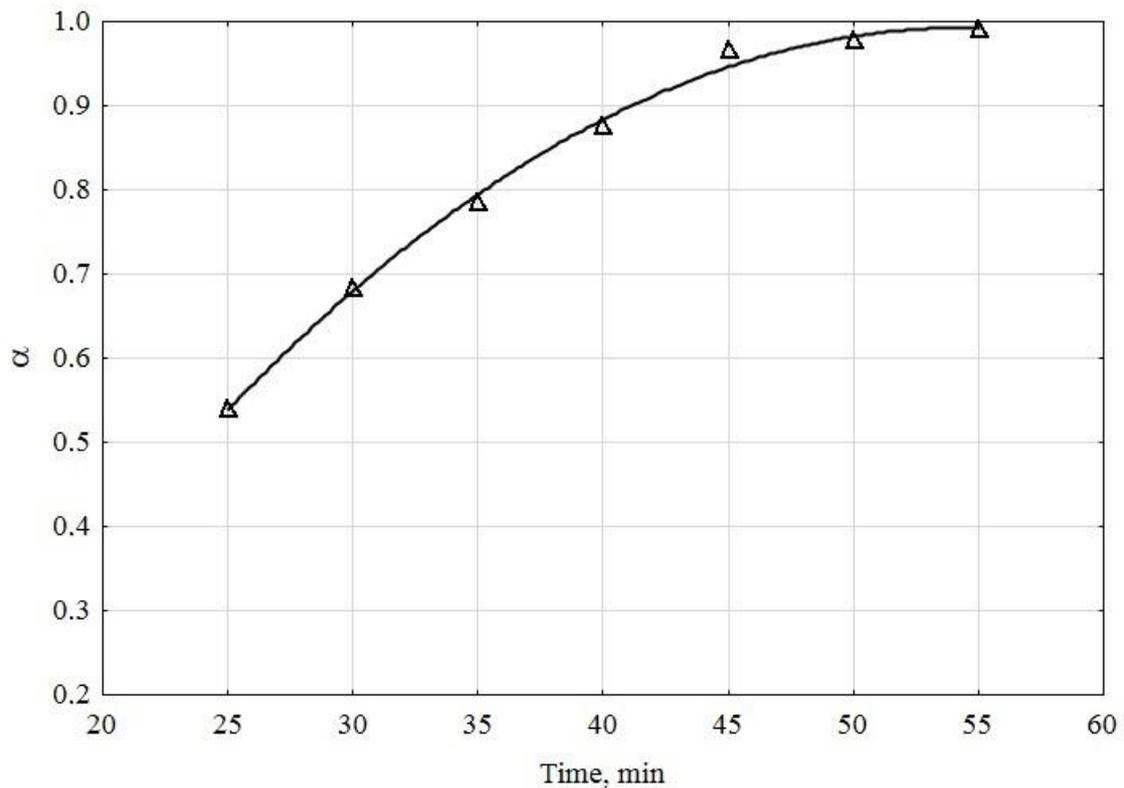


Figura 11 - Ajuste dos dados experimentais de conversão dos resíduos de placas de gesso no forno contínuo de elemento móvel helicoidal à lei cinética de Avrami-Eurofe'ev, $n=2$

$$: \alpha = 1 - \left(e^{-k^2 \cdot t^2} \right)$$

4 Conclusões

O presente trabalho apresentou um roteiro com sugestão para solucionar um problema que vem caracterizando as dificuldades dos processos produtivos para os polos gesseiros de todo o mundo. Concebeu um equipamento que produziu um produto de elevada qualidade e, por isso, pode ser considerado ambientalmente amigável. Deu os primeiros passos para o aproveitamento racional de resíduos do seu próprio produto (gesso beta), definindo condições operacionais otimizadas, já na etapa de laboratório, criando bases para a obtenção de correlações de scale-up que garantam processos produtivos promissores.

O objetivo principal do presente projeto foi alcançado e testada a capacidade do referido equipamento em obter gesso beta reciclável, confirmado pela microscopia eletrônica dos cristais do gesso produzido. Mediante os resultados conseguidos pelo desenvolvimento do presente trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

- é possível transformar 100 % dos resíduos de placas de gesso, obtidos de sobras de fabricação desses e de outros pré-moldados e da demolição de edificações, em um gesso beta para reuso em construção civil;
- é possível produzir gesso beta reciclável em condições tecnicamente otimizadas, em um forno contínuo, de elemento móvel helicoidal, controlando-se a temperatura e a pressão na câmara de reação do referido forno, obtendo-se cristais bem formados, com garantias de um produto de boa qualidade.
- nas condições experimentais globais otimizadas do forno helicoidal, sob domínio da etapa química, as condições da lei cinética que governou a desidratação térmica dos resíduos na câmara de reação foi a do modelo de Avrami-Eurofe'ev, com $n=2$;
- a produção de um gesso dentro de condições controladas de temperatura e pressão garantirá que, mesmo que a matéria-prima utilizada seja de qualidade inferior (resíduos de pré-moldados de gessos não recicláveis), o produto final terá suas especificações melhoradas.

Como etapa futura de continuidade deste trabalho sugere-se a realização de testes em escalas maiores para obtenção de correlações de scale-up adequadas. A adaptação do forno helicoidal para diferentes tipos de fontes de energia, principalmente do tipo alternativa (solar, eólica, biocombustíveis, etc.), apresenta-se como uma excelente opção adicional de continuidade para o desenvolvimento de um forno helicoidal comercial.

REFERÊNCIAS

- [1] Kumbhar, S.A.; Gruta, A.; Desai, D.B., Recycling and Reuse of Construction and Demolition Waste for Sustainable Development. OIDA International Journal of Sustainable Development, Vol. 6, No. 7, pp 83-92, 2013. ISSN: 1923-6662.
- [2] Vegas, I.; Broos, K.; Nielsen, P.; Lambertz, O. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. **Construction and Building Materials** Volume 75, 30 January 2015, Pages 121–128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

[3] Wang, W.; Wu, C. Benefits of adding rice straw coke powder to cement mortar and the subsequent reduction of carbon emissions. **Construction and Building Materials**, Volume 47, October 2013, Pages 616-622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.066.

[4] Arifi, E.; Ishimatsu, K.; Iizasa, S.; Namihira, T.; Sakamoto, H.; Tachi, Y.; Kato, H.; Shigeishi, M. Reduction of contaminated concrete waste by recycling aggregate with the aid of pulsed power discharge. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.001.

[5] Magallanes-Rivera, R.X.; Juarez-Alvarado, C.A.; Valdez, P.; Mendoza-Rangel, J.M. Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. **Construction and Building Materials**, Volume 37, December 2012, Pages 591-596. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054.

[6] Arifi, E.; Ishimatsu, K.; Iizasa, S.; Namihira, T.; Sakamoto, H.; Tachi, Y.; Kato, H.; Shigeishi, M. Reduction of contaminated concrete waste by recycling aggregate with the aid of pulsed power discharge. **Construction and Building Materials**, Volume 67, Part B, 30 September 2014, Pages 192-196. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.001.

[7] Macieira, R.P.; Avelar, T.C.; Nascimento, A.E.; Benachour, M.; Santos, V.A. Analysis of recyclable beta hemihydrate acquisition. *International Review of Chemical Engineering*, Vol. 4, No. 4, July 2012, Pages 399-404. ISSN 2035 – 1755.

[8] Lou, W.; Guan, B.; Wu, Z. Dehydration behavior of FGD gypsum by simultaneous TG and DSC analysis. *J. Therm Anal Calorim*, v. 104, p.661–669, 2011. doi 10.1007/s10973-010-1100-6.

[9] Khawam, A. and Flanagan, D. R. Role of isoconversional methods in varying activation energies of solid-state kinetics I. isothermal kinetic studies. *Thermochimica Acta*, 429 (2005) 93–102. doi:10.1016/j.tca.2004.11.030.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

[10] Hudson-Lamb, D.L.; Strydom, C.A.; Potgieter, J.H. **The thermal dehydration of natural gypsum and pure calcium sulphate dihydrate (gypsum)**. *Thermochimica Acta* Volumes 282–283, 10 July 1996, Pages 483–492. doi:10.1016/0040-6031(95)02819-6.

[11] Cave, S. R.; Holdich, R. G. The dehydration kinetics of gypsum in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 78, Issue 7, p.971-978, October 2000. doi: 10.1205/026387600528238.

[12] Kuntze R. A. Effect of water vapor on the formation of $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ modifications. *Canadian Journal of Chemistry*. v. 43, p.2522-2529, 1965.

[13] Rüdüsüli, M., Schildhauer, T. J., Biollaz, S. M., and van Ommen, J. R.: Scale-up of bubbling fluidized bed reactors - a review. *Powder Technology*. 217(0): 21–38, 2012.

[14] Macieira, R.P.; Avelar, T. de C.; Nascimento, A.E.; Benachour, M.; Santos, V.A., Abalysis of Recyclable Beta Hemihydrate. *International Review of Chemical Engineering*, Vol. 4, N. 4, pp. 399-404, July, 2012. ISSN 2035-1775.

[15] Aslan, N. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. Volume 185, Issue 1, 10 June 2008, Pages 80–86. doi:10.1016/j.powtec.2007.10.002.

[16] Myers, R. H.; Montgomery, D. C.; Anderson-Cook, C. M. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 3rd Ed. New York: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-17446-3.

[17] Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments: Response Surface Method and Designs*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2005. ISSN: ????

[18] Anderson-Cook, C.M.; Borror, C.M.; Montgomery D.C., Response surface design evaluation and comparison. *Journal of Statistical Planning and Inference*, Volume 139, Issue 2, 1 February 2009, Pages 629–641. doi:10.1016/j.jspi.2008.04.004.

[19] Morshedi, A; Akbarian, M. Application of response surface methodology: design of experiments and optimization: a mini review. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*, Vol. 4 (S4), pp. 2434-2439, 2014, ISSN: 2231– 6345 (Online).

[20] Candiotti, L.V.; De Zan, M.M.; Cámara M.S.; Goicoechea, C.H. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development, *Talanta* 124 (2014) 123–138. doi:10.1016/j.talanta.2014.01.034

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

[21] Al-Baali, M. and Khalfan, H. **A combined class of self-scaling and modified quasi-Newton methods**. Computational Optimization and Applications Volume 52 Issue 2, June, 393-408, 2012. Doi:10.1007/s10589-011-9415-1.

[22] Ballirano, P.; Melis, E. Thermal behaviour and kinetics of dehydration in air of bassanite, calcium sulphate hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), from X-ray powder diffraction. Eur. J. Mineral. 2009, 21, 985–993. DOI: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1973.

CAPÍTULO 3

ANEXOS

Optimisation of Recyclable Beta Plaster Using Plaster Waste in a Continuous Reactor with a Mobile Helical Element

Mendonça, R. S^a.; Santos, L.B^b.; Moura, A.E^c.; Sarubbo, L.A^{a,*}.; Vasconcelos, E.C.^b.; Santos, V. A^a.

^a Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, CEP: 50050-900, Recife, Pernambuco, Brasil

^b Padrão Gypsum, Araripina, Pernambuco, Brasil

^c Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, CEP: 50670-901, Recife, Pernambuco, Brasil

* Endereço de correspondência para autor. Tel.: +55 81 21194084; fax: +55 81 21194000. E-mail address: leonie@unicap.br (L. Sarubbo)

Abstract: Experiments were performed to investigate optimised operational conditions for the production of recyclable plaster based on plaster waste from construction and demolition projects or the plasterboard industry in a continuous furnace with a mobile helical element on a bench scale. After the definition of the granulometry that provided the reaction conditions with no diffusive effects, a 2^2 rotational central composite design was used for the experimental planning, the factors of which were mean reactor temperature (148 °C and 162 °C) and gauge pressure (0.2 to 0.8 bar). The statistical analysis of the results based on the response surface methodology allowed the identification of the optimised operational conditions (162.4 °C and 0.5 bar). Under these conditions, the Avrami-Eurofe'ev equation was tested and confirmed ($n = 2$) for the kinetics of the thermal dehydration process.

Keywords: Helical agitator; Thermal dehydration; Avrami-Eurofe'ev equation; Recyclable beta plaster.

1. INTRODUCTION

Huge catastrophes in the last century, such as wars and earthquakes, were a driving force in the practice of recycling in locations with large volumes of waste as well as urgent needs for construction and infrastructure. During and after World War II, approximately 115 million m³ of construction and demolition debris were recycled in Germany and used in the construction of approximately 175 thousand habitation units [1]. In recent decades, a number of countries have adopted recycling performed by companies in diverse sectors, mainly for environmental and economic reasons. Other reasons that have contributed to the recovery of waste material in recent decades include the over-exploitation of aggregate mines, the discarding of untreated waste, the generation of a greater volume of debris than the construction of roads can absorb and the overloading of landfills [2].

The benefits of recycling in civil construction consist mainly in reductions in the consumption of non-renewable natural resources, areas needed for landfills, the amount of waste generated, the consumption of energy during production processes and pollution [3]. In some countries, the main commercial emphasis on the recycling of construction/demolition debris has been the installation of mortar machines at construction sites to shred waste products. Despite apparently offering economic benefits to construction companies, this mortar production method has problems due to a lack of

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

planning and knowledge regarding the subject on the part of civil engineers. In many cases, construction sites do not have sufficient space for the installation of the machine or debris storage, which varies depending on the size of the construction project. There is no rational management of the waste generated that minimises expenditures with recycling and avoids the contamination of the debris to be recycled by undesirable materials, such as steel, plaster, plastic, wood, etc., which render recycling unviable [4].

In the case of plaster waste, first-world countries report using up to 22% recycled plaster with no negative effect on performance, which is a proven technology in the external market [5]. Such reuse models are valid for homogeneous debris from the plaster industry. Since the waste is generated from the material left over after moulding, there is little risk that such material is contaminated by physical agents. In the case of contaminated debris, there is a need to use recycling plants [6]. However, it has been possible to produce recyclable plaster, with a recovery rate close to 100% from the waste of the plasterboard industry [7].

The difficulty in the technology of the reuse of waste plaster involves the complexity of heterogeneous reactions, the majority of which does not depend merely on concentration and temperature, but also on diffusion processes, heat transfer and the contact area between reagents (solid-solid or solid-liquid). This dependence impedes the possibility of theoretically predicting the kinetic behaviour of most reactions and experiments are needed to propose a kinetic model or compare the reactions of existing models [8] – [12].

Besides the production of recyclable material, it is necessary to replace the use of *in natura* gypsum ore for the production of plaster through the reuse of waste from plasterboard to preserve the reserves of this mineral or use it in the most rational manner possible. Thus, there is a preeminent need to develop equipment on the laboratory scale that allows the identification of kinetic mechanisms and facilitates the monitoring of experiments on different scales [13]. This would allow arriving at adequate scale-up correlations and the early definition of optimised conditions for an environmentally friendly process.

2 MATERIAL AND METHODS

2.1 Continuous reactor with movable helical element

Figure 1 illustrates the pilot reactor furnace developed in the present study for the production of recyclable beta plaster using waste from the plasterboard industry or duly prepared construction/demolition debris. The plasterboard waste is fed into the furnace through a feeder (1) and continuously transported through a thermal dehydration chamber (2) in a U-shaped trough using a helical (screw) transporter (3). The screw transporter is activated by an electric motor coupled to a velocity reducer (4) controlled with the aid of a frequency inverter. A calcination chamber is another term used in the plaster industry to designate the thermal dehydration device. Near the exit, the thermal dehydration chamber takes on a cone trunk shape (5) to establish a type of seal and avoid the escape of the water vapour resulting from the thermal dehydration of the plaster waste as well as facilitate the maintenance of a given pressure. A cylinder (6) with a diameter equal to the smallest base of the cone trunk complements the extension of the thermal dehydration chamber and sealing of the pressure in the reactor. The exit point (7) of the recyclable plaster produced is located at the end of this cylinder.

Heating of the reactor is achieved with the use of electrical resistors (8). The dehydration chamber of the reactor and the helical component were constructed in AISI 314 stainless steel. The entire equipment is supported by a carbon steel frame (9) with L-shaped brackets measuring 1 inch. The internal diameter of the reaction chamber is 0.2 m, with a length of 1.0 m and a capacity to process 50 kg of waste plaster per hour. Temperature (10) and gauge pressure (11) sensors were installed along the axial length of the dehydration chamber.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

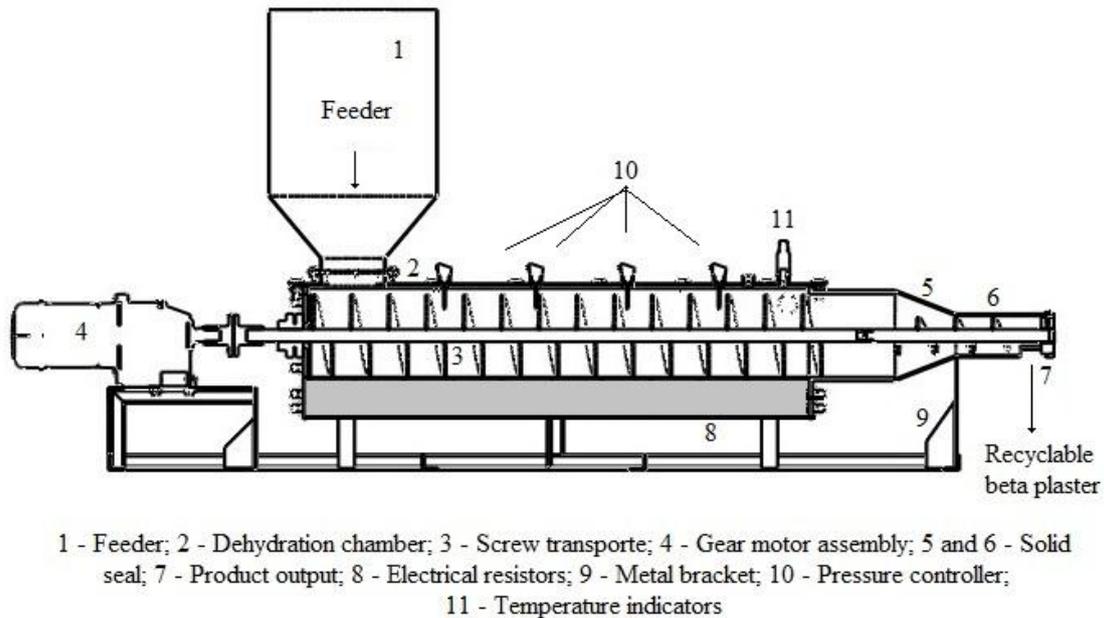


Figure 1. Schematic of components of pilot continuous reactor with mobile helical element



Figure 2. Photograph of continuous reactor with mobile helical element on bench scale

2.2 Waste plasterboard

The plaster waste used in the runs in the present study was identified as waste plasterboard for lining ceilings and serving as dividers, reused after three cycles, as described elsewhere [14]. Table 1 displays the results of the chemical analysis and composition of this material. This table shows the mean chemical composition of the

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

waste plasterboard, demonstrating considerable chemical similarity in the mean composition of the gypsum ore originally used.

Table 1. Chemical composition of waste obtained from plasterboard

Oxides/elements	Chemical Composition (wt%)	
	Waste plasterboard	Gypsum ore
Moisture (50 °C)	6.01	0.06
Combined water (200 °C)	19.68	19.1
SiO ₂	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	0.10	0.00
CaO	31.00	32.58
MgO	0.00	0.03
CO ₂	0.00	1.73
MnO	0.00	0.00
SO ₃	43.21	46.54

The waste plasterboards were ground and granulometry was determined for the identification of particle size so that the diffusion effect could be discarded, predominating the chemical step for the thermal dehydration reaction. The conversion of this reaction was calculated with the aid of a thermal scale (GEHAKA IV, model 2000) that uses the infrared method for the quantification of moisture in plaster samples. The analysis of the conversion behaviour of the waste into beta gesso (Figure 3) was performed at a gauge pressure of 0.5 bar and temperature of 140 °C. The figure shows the effects of the mean particle diameter of the hydrated plaster waste in relation to the conversion of the reaction. The graph demonstrates that the conversion of the waste becomes independent of particle size when the mean diameter is equal to or less than 220 µm, thereby characterising the conditions for obtaining a chemical regimen as a controlling effect of the overall velocity of the acquirement of the semi-hydrated beta plaster.

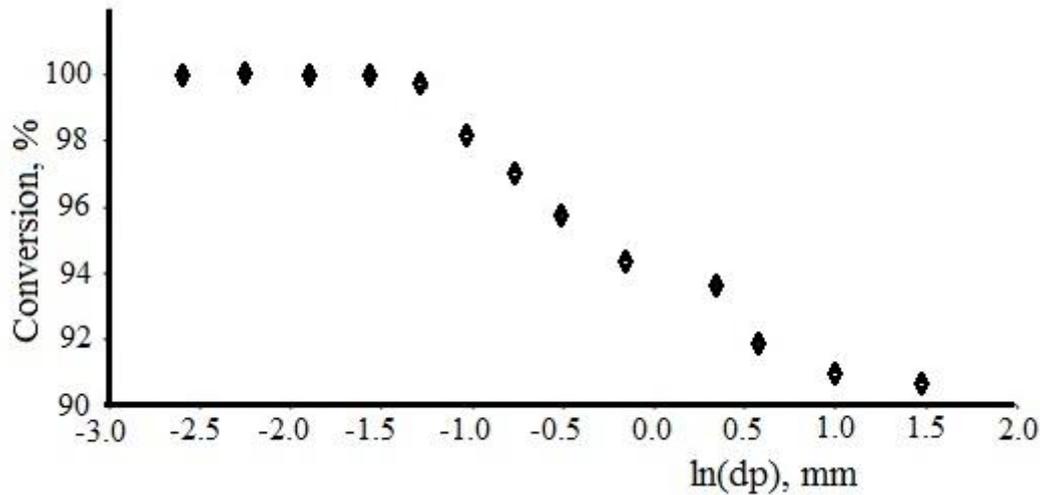


Figure 3. Graph of conversion behaviour of thermal dehydration reaction in function of granulometry of waste plasterboard particles

2.3 Planning of experiments

The response surface methodology consists of a set of mathematical and statistical methods for an empirical study of the relationships between independent variables (also denominated factors) and dependent variable (response) [15]. This method can also be understood as a combination of experiment planning techniques, regression analysis and optimisation methods.

Experiment planning is the basis for obtaining a model to describe the response variable in function of the ranges of the factors. This function is denominated the response surface and the resulting model is used to predict the new product or process developed. The response surface methodology is sequential - when one wishes to determine a point farther from the optimal point, a first-order model fits the experimental data well [16]. However, when the optimal point is the main target, a second-order model should be used, leading to the choice of a central composite design, which should be used when one wishes to determine the curvature of a plane (maximum or minimum point) and when one wishes to determine the quadratic terms in the regression model.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

A rotational central composite design (RCCD) consists of a part referring to the 2^k factorial planning, $2k$ axial runs and n_C central runs ($n_C \geq 4$). The use of the RCCD allows [17]:

- Determining which variables exert the greatest influence on the result;
- Attributing values to influential variables in order to optimise the mean response;
- Attributing values to influential variables in order to minimise the variability in the results.

The building of the model occurs based on multiple regression analysis, in which the estimation of the coefficients of the regression variables occurs. For such, a quadratic regression model is suggested, as suggested in Equation 1:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} \cdot X_i^2, \text{ in which } \beta_{ij} = \beta_{ji} \quad (1)$$

This design is used for experiments in which k (factors) ≥ 2 . It has points from the cubic part coded ± 1 , axial points coded $\pm \alpha$, in which $\alpha = (2^k)^{1/4}$ to test the second-order model, and a central point coded 0, which generally has repetitions.

The results of the thermal dehydration of the waste plasterboard were analysed with the aid of the STATISTICA software program (v. 12.0), with which the effects of the variables and their interactions on the response were estimated, considering a 5% significance level ($p < 0.05$). Analysis of variance (ANOVA) was used to test the validity of a mathematical prediction model using the F test and the calculation of the coefficient of variance explained by the model. The response surface method was used to optimise the production conditions and furnish an adequate mathematical model for the responses. Models with low R^2 were not discarded for the purposes of optimisation, but served only to test the influence of the variables on the response [15].

3. RESULTS AND DISCUSSION

To analyse the influence of the factors on the conversion of the plasterboard waste into recyclable beta plaster, a 2^2 RCCD was performed to test the independent variables gauge pressure (bar) and corresponding temperature ($^{\circ}\text{C}$) as operational conditions of the thermal dehydration chamber. The factors were varied, as demonstrated by the levels listed in Table 2, totalling 12 experiments distributed as follows: four complete factorial points, four central points and four axial points [17].

Table 2. Real and coded values (+ higher level, 0 intermediate, - lower level) of independent variables in CCRD (2^2) for thermal dehydration of plasterboard waste

Factor	Level				
	-1.41	-1	0	+1	+1.41
X_1 – Gauge pressure, bar	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8
X_2 – Temperature, $^{\circ}\text{C}$	148	150	155	160	162

The following parameters were found to be the response variables: unitary mass in kg/m^3 , compression strength in Mpa and Shore hardness in MPa. After each 60-minute run, the experimental data were recorded and submitted to analyses following the criteria for the response surface method, as described elsewhere [16].

The operational conditions employed ensured a minimum conversion of 90%, which is an adequate rate for practice in commercial processes. Table 3 shows a similar behaviour for the three response variables (unitary mass, compression strength and Shore hardness). The maximum values of these properties of the plaster produced occurred around the central points of the planning, thereby demonstrating the adequate choice of values for the ranges of the experimental conditions. The adequate experimental conditions were confirmed with the aid of images acquired using a scanning electron microscope (SEM) (Figure 5).

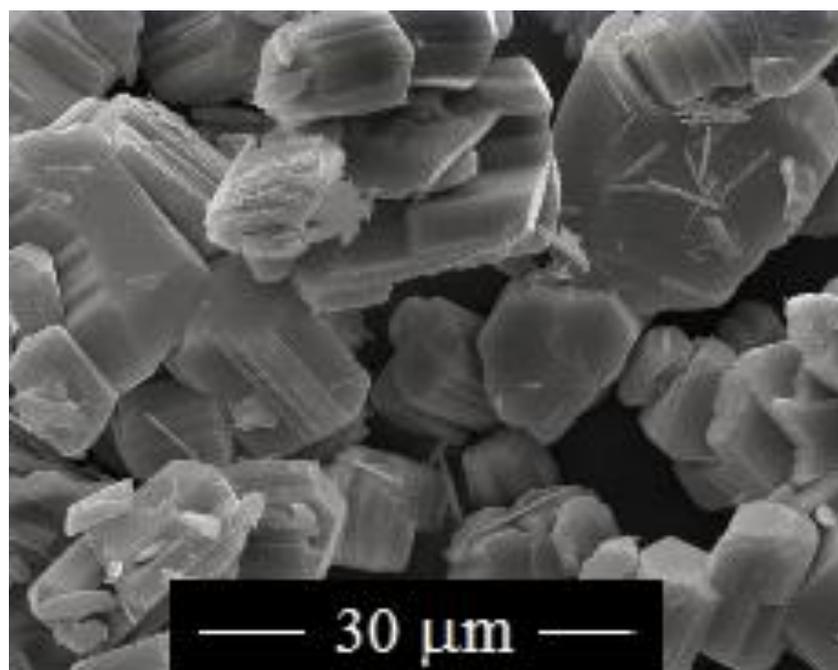


Figure 5. SEM micrograph of beta plaster produced by continuous helical furnace

Table 3. CCRD (2^2) matrix with independent variables and response values for thermal dehydration of plasterboard waste

Number	Factor		Dependent variables		
	Gauge pressure	Temperature	Unitary mass (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)	Shore hardness (MPa)
	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
1	0.3(-1)	150(-1)	734	17.10	53.53
2	0.3(-1)	160(+1)	755	15.32	47.33
3	0.7(+1)	150(-1)	842	24.00	68.59
4	0.7(+1)	160(+1)	800	20.10	61.00
5	0.2(-1.41)	0	760	17.09	48.08
6	0.8(+1.41)	0	822	24.10	65.41
7	0.5(0)	148(-1.41)	800	23.00	62.03
8	0.5(0)	162(+1.41)	751	19.50	57.12
9	0.5(0)	155(0)	866	27.00	74.00
10	0.5(0)	155(0)	860	26.50	75.07
11	0.5(0)	155(0)	865	25.98	73.81
12	0.5(0)	155(0)	860	26.30	73.80

Using ANOVA (F test) and comparing the calculated F to the tabulated F, it is possible to determine whether the prediction models obtained are valid based on the fit to the experimental data. Tables 4, 5 and 6 displays the ANOVA results for the unitary mass, compression strength and Shore hardness response variables, respectively, with the ratios between the calculated F and tabulated F for a 95% confidence interval.

Table 4. Variance analysis for validation of unitary mass prediction model

Factor	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	p-value
X ₁ (L)	7,240.93	1	7,240.93	69.75	0.000117
X ₁ (Q)	8,294.40	1	8,294.40	79.90	0.000095
X ₂ (L)	1,019.18	1	1,019.18	9.82	0.002146
X ₂ (Q)	12,250.00	1	12,250.00	118.00	0.000053
X ₁ · X ₂	992.25	1	992.25	9.56	0.002232
Lack of fit	825.39	3	275.13	2.89	0.011431
Pure error	30.75	3	10.25	-	-
Total	27,308.92	11	-	-	-

$R^2 = 0.9687$ (96.87 % of total variability in data can be explained by regression model)

Table 5. Variance analysis for validation of compression strength prediction model

Factor	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	p-value
X ₁ (L)	58.2856	1	58.28565	31.48	0.000383
X ₁ (Q)	72.8190	1	72.81902	39.43	0.000275
X ₂ (L)	14.1239	1	14.12394	7.63	0.003101
X ₂ (Q)	59.3653	1	59.36532	32.07	0.000373
X ₁ · X ₂	1.1236	1	1.12360	0.607	0.089313
Lack of fit	6.8828	3	2.29426	1.35	0.033262
Pure error	0.5483	3	0.18277	-	-
Total	191.2609	11	-	-	-

$R^2 = 0.9611$ (96.11 % of total variability in data can be explained by regression model)

Table 6. Variance analysis for validation of Shore hardness prediction model

Factor	SQ	GL	MQ	F _{ratio}	p-value
X ₁ (L)	354.290	1	354.2899	94.94	0.000074
X ₁ (Q)	501.193	1	501.1932	134.30	0000044
X ₂ (L)	53.736	1	53.7362	14.40	0.001222
X ₂ (Q)	353.728	1	353.7276	94.79	0.000074
X ₁ · X ₂	0.483	1	0.4830	0.13	0.335295
Lack of fit	8.686	3	2.8954	0.85	0.062168
Pure error	1.105	3	0.3685	-	-
Total	1,133.404	11	-	-	-

$R^2 = 0.9914$ (99.14 % of total variability in data can be explained by regression model)

From the data displayed in Table 6, the ratios between the tabulated F and calculated F for “lack of fit” less than 4 and excellent coefficients of determination (R^2) indicate that the models in Equations 2 to 4 fit at the experimental points and are adequate [18]. The following are the coded proposed models for the representation of the response variables studied:

$$UM(\text{kg/m}^3) = -42352 + 3492 \cdot P - 900 \cdot P^2 + 548 \cdot T - 1,8 \cdot T^2 - 15,7 \cdot P \cdot T \quad (2)$$

$$CE(\text{MPa}) = -2928 + 180 \cdot P - 84,3 \cdot P^2 + 37,8 \cdot T - 0,1 \cdot T^2 - 0,5 \cdot P \cdot T \quad (3)$$

$$SH(\text{MPa}) = -2928 + 180 \cdot P - 84,3 \cdot P^2 + 37,8 \cdot T - 0,1 \cdot T^2 - 0,5 \cdot P \cdot T \quad (4)$$

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

With the prediction models (Equations 2 to 4), the STATISTICA program furnished three-dimensional graphs for the response variables in function of temperature and gauge pressure (Figures 6 to 8). These graphs demonstrate the behaviour of unitary mass, compression strength and Shore hardness as a function of gauge pressure and temperature in the thermal dehydration chamber. The STATISTICA program allowed the determination of the optimised conditions indicated with the aid of the following figures.

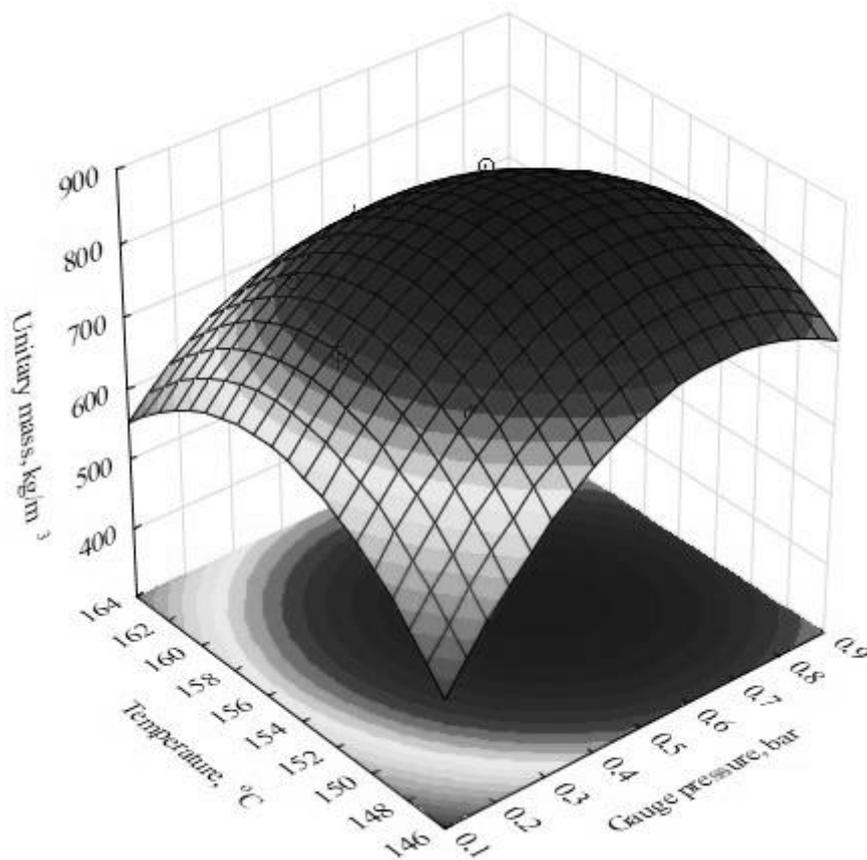


Figure 6. Response surface of unitary mass in function of temperature and gauge pressure for thermal dehydration of plasterboard waste

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

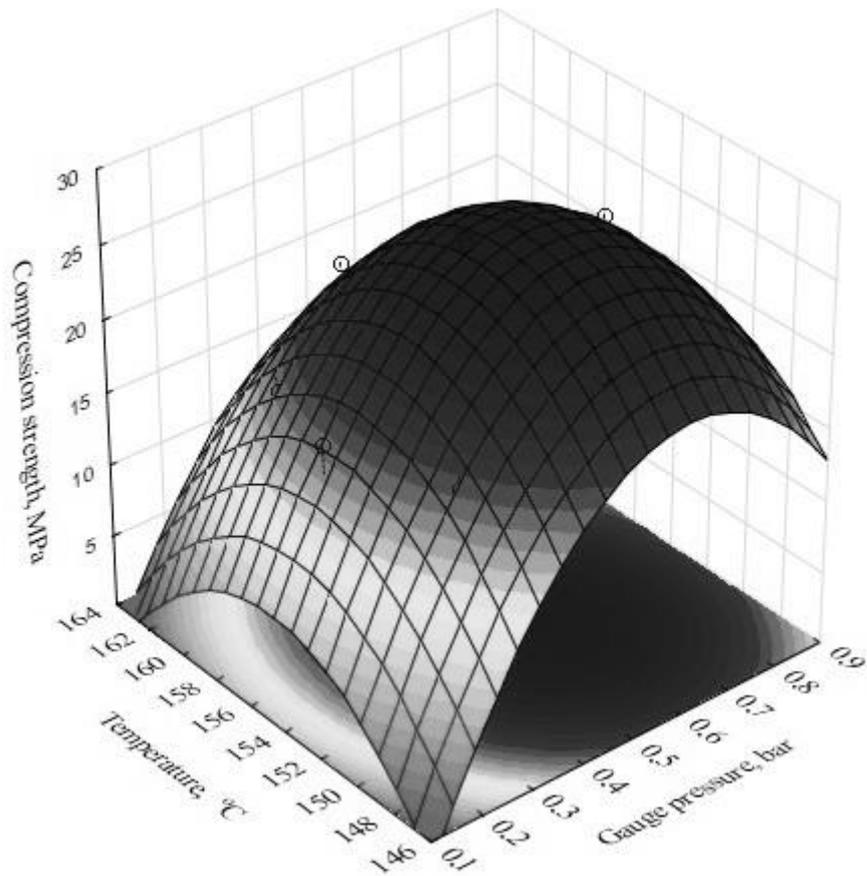


Figure 7. Response surface of compression strength in function of temperature and gauge pressure for thermal dehydration of plasterboard waste

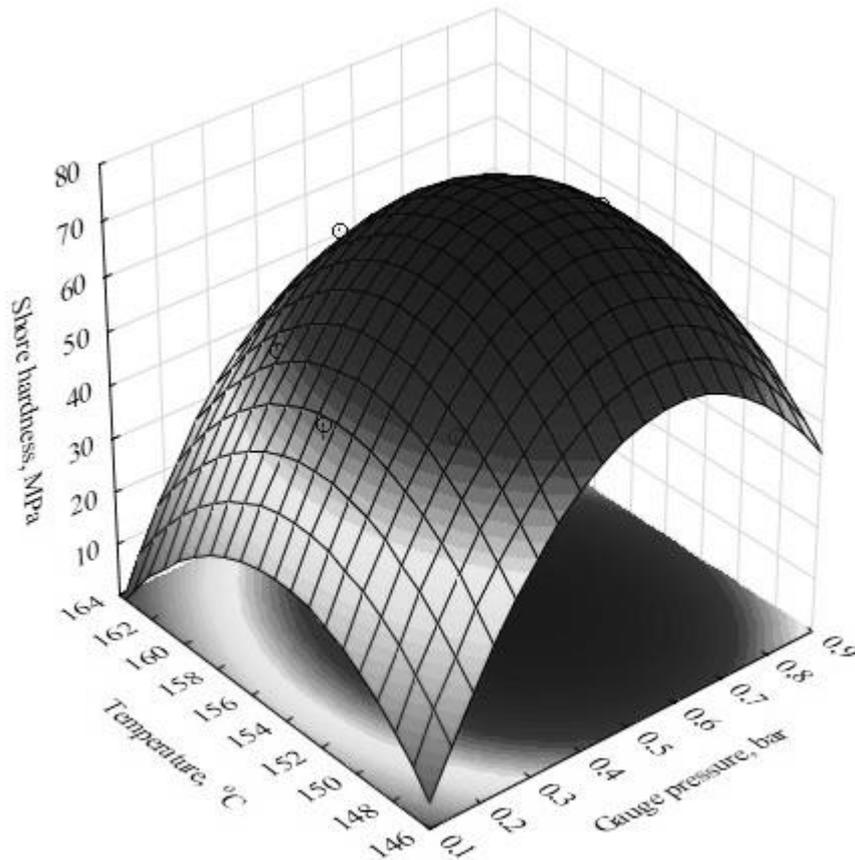


Figure 8. Response surface of Shore hardness in function of temperature and gauge pressure for thermal dehydration of plasterboard waste

With more than one response variable, it is generally desirable to find the optimum operational conditions of the factors that simultaneously meet all the necessary requirements of the dependent variables. These operational conditions can be determined with the aid of restricted optimisation technique based on nonlinear programming [19]. The STATISTICA program converts each response y_i into an individual function (desirability – d_i) ranging from $0 \leq d_i \leq 1$. If the response target is desired, $d_i = 1$, and if the response target is outside the desired region, $d_i = 0$. Thus, the factors are chosen to maximise global desirability [20].

To obtain the factors at precisely the optimum values, the STATISTICA program was used for the optimisation with restrictions of the response variables. For such, the *Means* menu was used, within which the *Response desirability profiling* option was chosen. Figure 9 demonstrates the optimum points of the three response variables (unitary mass = 866 kg/L, compression strength = 27 MPa and Shore hardness = 75.1 MPa) as well as the operational conditions that led to the optimum of the responses (temperature

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

= 162.7 °C and gauge pressure = 0.5 bar). The global desirability function was 0.995.

Figure 10 shows the response surface related to the function.

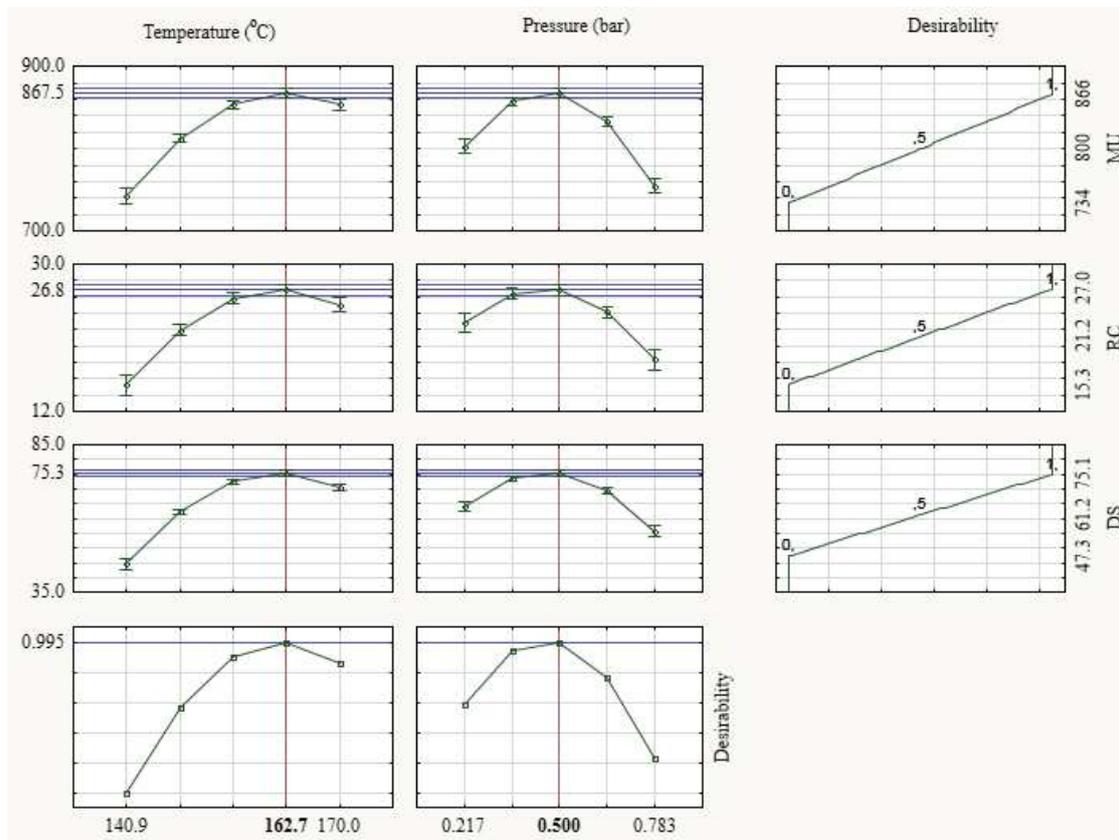


Figure 9. Desirability function for optimum thermal dehydration conditions for plasterboard waste

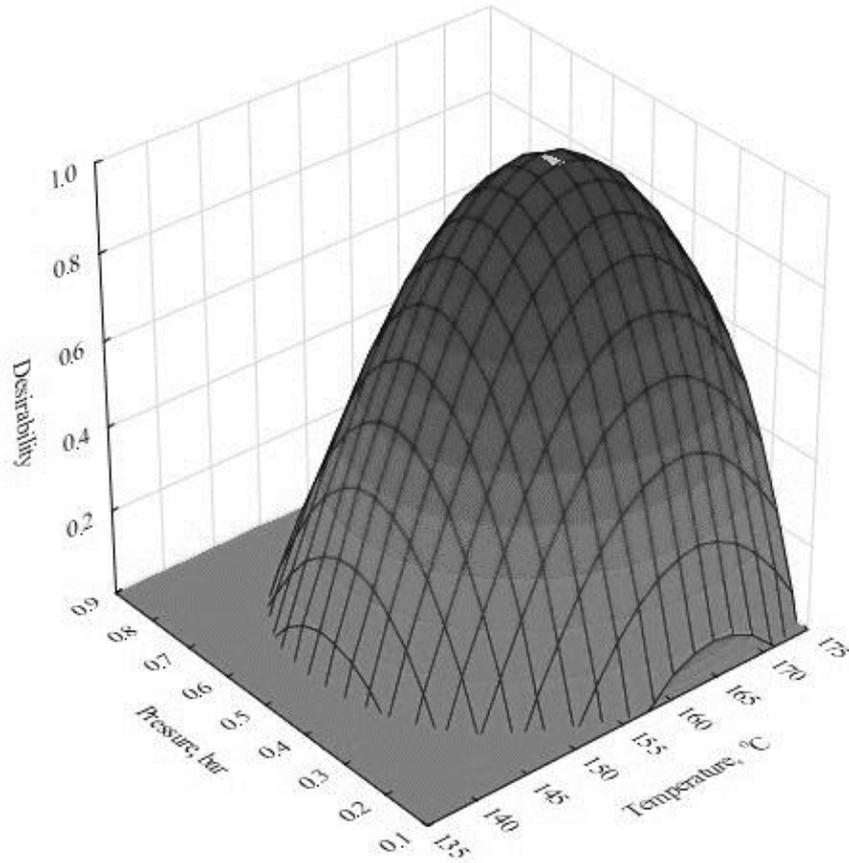


Figure 10. Plot of global desirability function for optimum thermal dehydration conditions of plasterboard waste

Once the optimised pressure and temperature conditions were defined for the thermal dehydration of plasterboard waste, an isometric curve was determined for the behaviour of the conversion (α) of this material into recyclable plaster in function of time. To maintain the optimised operational conditions of the reactor, the rotation of the equipment was maintained at 0.04 rpm, obtaining a mean residence time for the waste material on the order of 60 minutes, which corresponded to a mean production rate of 50 kg of plaster per hour. The volume correction factor (λ) for the plasterboard waste, calculated for the transport by the helical element of the furnace, was 0.4. Figure 11 illustrates the conversion behaviour with the reaction time of the thermal dehydration reaction at 0.5 bar and 162.7 °C. The regression equation and fit of a third-order polynomial to the experimental data is given by Equation 5, for an explained variance of 99.72 % [21]:

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

$$\alpha = -22.8167 + 3.0089 \cdot t + 0.0176 \cdot t^2 - 0.0006 \cdot t^3 \quad (5)$$

in which

α = percentage (%) of conversion of plasterboard waste into recyclable beta gesso;

t = reaction time in minutes.

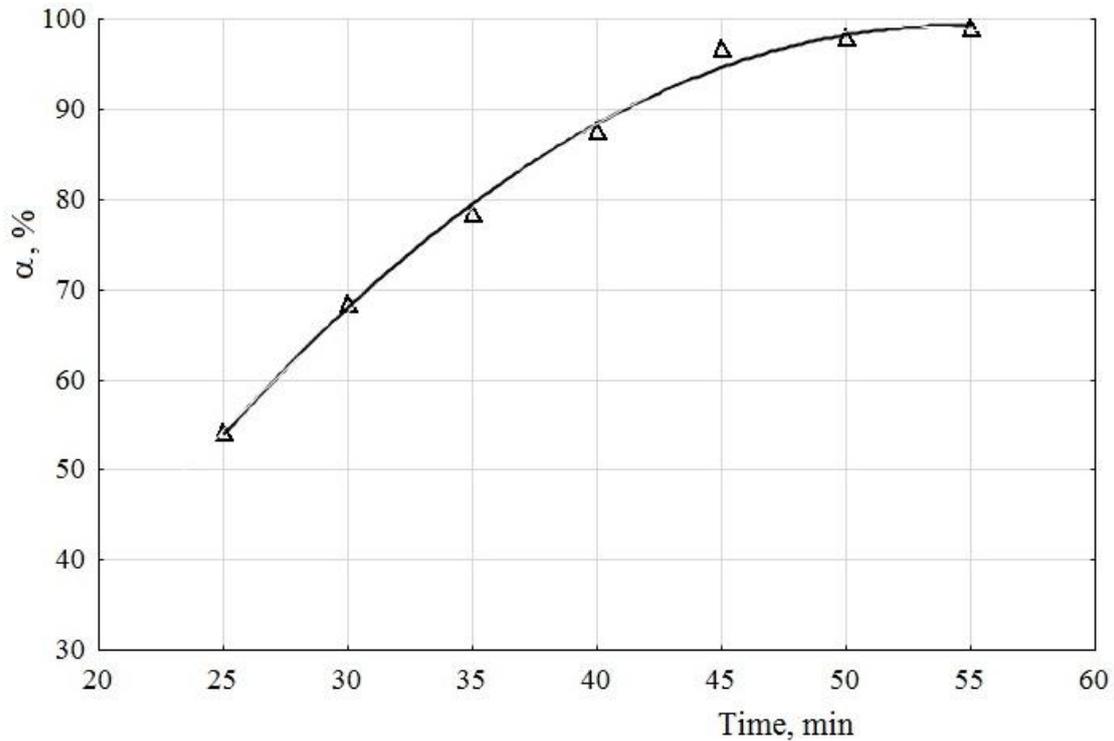


Figure 11. Conversion of thermal dehydration of plasterboard waste in function of reaction time in helical mobile element reactor

The isothermal analysis of the experimental data for the optimised reactor conditions used in this investigation demonstrated that the conversion of the waste material gave rise to fits with little convergence regarding the majority of models described in the literature, with special concordance with the Avrami-Eurofe'ev equation [22]. In this case, an explained variance rate of 98.73% was found for the fit of the data when $n = 2$. Thus, the kinetic model adopted for the thermal dehydration of plasterboard waste was given by:

$$\alpha = 1 - \left(e^{-k^n \cdot t^n} \right) \quad (6)$$

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

in which k is the velocity constant and n is the parameter responsible for the description of the reaction mechanism ($n = 2$). Figure 12 illustrates the behaviour of the converted portion of the waste material (α) in function of reaction time. This type of reaction mechanism model predicts that it is nearly impossible to maintain an accelerated reaction rate throughout the entire length of the chamber. As the nuclei of the product begin to grow, they impede potential nucleation sites from generating further nuclei, which is a phenomenon known as ingestion [22]. Moreover, the area of contact between the nucleus and reagent diminishes when two nuclei grow and adhere to one another, which is known as coalescence, thereby reducing the velocity of the reaction.

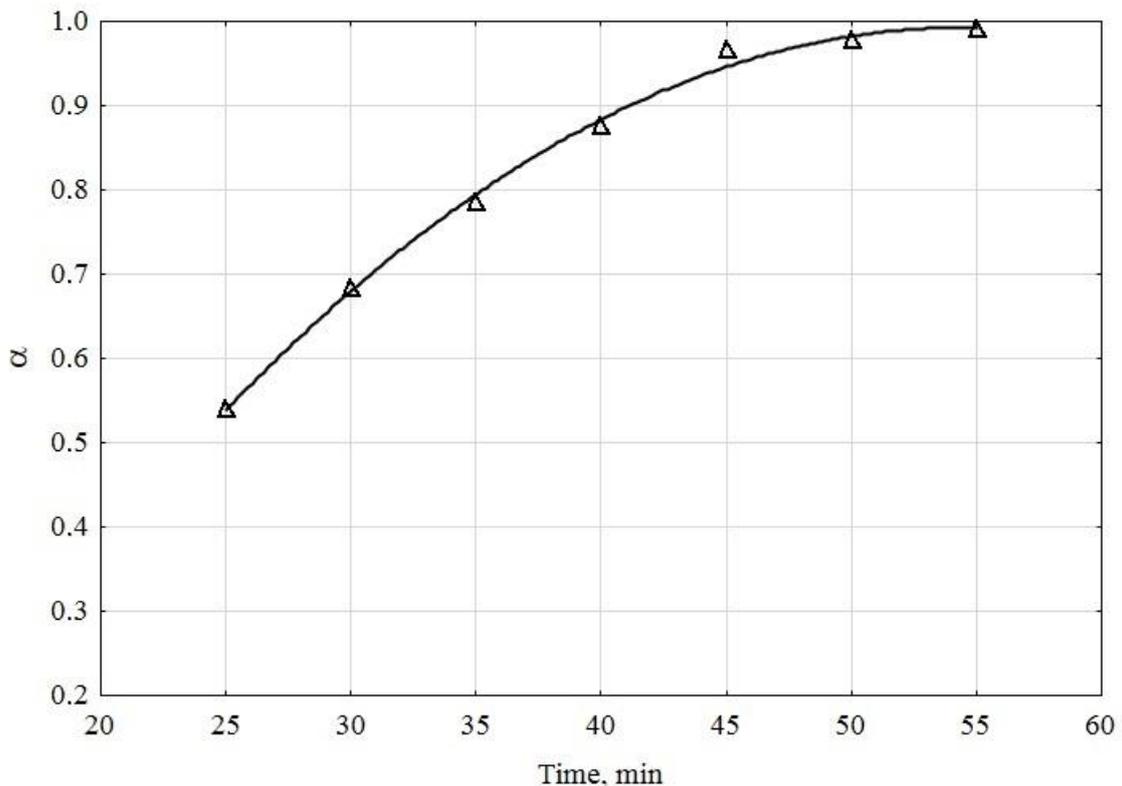


Figure 12. Fit of experimental data of conversion of plasterboard waste in continuous reactor with helical element to Avrami-Eurofe'ev kinetic law ($n = 2$):

$$\alpha = 1 - \left(e^{-k^2 \cdot t^2} \right)$$

4. CONCLUSIONS

This paper presented a method to solve a problem that has characterised difficulties in productive processes for plaster centres throughout the world. Equipment was designed to produce a high-quality product and, as such, could be considered environmentally friendly. The first steps have been taken toward the rational use of waste from the product itself (beta plaster) by defining optimised operational conditions in the laboratory setting, thereby creating the basis for the acquirement of scale-up correlations to ensure promising productive processes.

The principal aim of the present study was achieved and the capacity of the equipment to produce recyclable beta plaster was tested and confirmed by electron scanning microscopy of the plaster crystals produced. Based on the results, the following conclusions may be drawn:

- It is possible to transform 100% of plasterboard waste obtained from manufacturing leftovers and other plasterboard from demolition projects into beta plaster for reuse in civil construction;
- It is possible to produce recyclable beta plaster under technically optimised conditions in a continuous reactor with a mobile helical element by controlling the temperature and pressure of the reaction chamber, obtaining well-formed crystals and ensuring a product of good quality;
- Under optimised global experimental conditions of the helical reactor in the domain of the chemical step, the Avrami-Eurofe'ev model ($n = 2$) was the kinetic law that governed the thermal dehydration of the plasterboard waste in the reaction chamber;
- The production of plaster under controlled temperature and pressure conditions ensures that, even when the raw material is of inferior quality (non-recyclable plasterboard waste), the final product will have improved specifications.

As a future step in the continuity of this study, tests on a larger scale are recommended to determine adequate scale-up correlations. The adaptation of the helical reactor to different sources of energy, especially alternative sources (solar, wind, biofuels, etc.) is an excellent additional option to give continuity to the development of a commercial helical reactor.

REFERENCES

- [1] Kumbhar, S.A.; Gruta, A.; Desai, D.B., Recycling and Reuse of Construction and Demolition Waste for Sustainable Development. OIDA International Journal of Sustainable Development, Vol. 6, No. 7, pp 83-92, 2013. ISSN: 1923-6662.
- [2] Vegas, I.; Broos, K.; Nielsen, P.; Lambertz, O. Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. **Construction and Building Materials** Volume 75, 30 January 2015, Pages 121–128. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109.
- [3] Wang, W.; Wu, C. Benefits of adding rice straw coke powder to cement mortar and the subsequent reduction of carbon emissions. **Construction and Building Materials**, Volume 47, October 2013, Pages 616-622. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.066.
- [4] Arifi, E.; Ishimatsu, K.; Iizasa, S.; Namihira, T.; Sakamoto, H.; Tachi, Y.; Kato, H.; Shigeishi, M. Reduction of contaminated concrete waste by recycling aggregate with the aid of pulsed power discharge. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.001.
- [5] Magallanes-Rivera, R.X.; Juarez-Alvarado, C.A.; Valdez, P.; Mendoza-Rangel, J.M. Modified gypsum compounds: An ecological–economical choice to improve traditional plasters. **Construction and Building Materials**, Volume 37, December 2012, Pages 591-596. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.054.
- [6] Arifi, E.; Ishimatsu, K.; Iizasa, S.; Namihira, T.; Sakamoto, H.; Tachi, Y.; Kato, H.; Shigeishi, M. Reduction of contaminated concrete waste by recycling aggregate with the aid of pulsed power discharge. **Construction and Building Materials**, Volume 67, Part B, 30 September 2014, Pages 192-196. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.001.
- [7] Macieira, R.P.; Avelar, T.C.; Nascimento, A.E.; Benachour, M.; Santos, V.A. Analysis of recyclable beta hemihydrate acquisition. International Review of Chemical Engineering, Vol. 4, No. 4, July 2012, Pages 399-404. ISSN 2035 – 1755.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

- [8] Lou, W.; Guan, B.; Wu, Z. Dehydration behavior of FGD gypsum by simultaneous TG and DSC analysis. *J. Therm Anal Calorim*, v. 104, p.661–669, 2011. doi 10.1007/s10973-010-1100-6.
- [9] Khawam, A. and Flanagan, D. R. Role of isoconversional methods in varying activation energies of solid-state kinetics I. isothermal kinetic studies. *Thermochimica Acta*, 429 (2005) 93–102. doi:10.1016/j.tca.2004.11.030.
- [10] Hudson-Lamb, D.L.; Strydom, C.A.; Potgieter, J.H. **The thermal dehydration of natural gypsum and pure calcium sulphate dihydrate (gypsum).** *Thermochimica Acta* Volumes 282–283, 10 July 1996, Pages 483–492. doi:10.1016/0040-6031(95)02819-6.
- [11] Cave, S. R.; Holdich, R. G. The dehydration kinetics of gypsum in a fluidized bed reactor. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 78, Issue 7, p.971-978, October 2000. doi: 10.1205/026387600528238.
- [12] Kuntze R. A. Effect of water vapor on the formation of $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ modifications. **Canadian Journal of Chemistry**. v. 43, p.2522-2529, 1965.
- [13] Rüdüsüli, M., Schildhauer, T. J., Biollaz, S. M., and van Ommen, J. R.: Scale-up of bubbling fluidized bed reactors - a review. *Powder Technology*. 217(0): 21–38, 2012.
- [14] Macieira, R.P.; Avelar, T. de C.; Nascimento, A.E.; Benachour, M.; Santos, V.A., Abalysis of Recyclable Beta Hemihydrate. *International Review of Chemical Engineering*, Vol. 4, N. 4, pp. 399-404, July, 2012. ISSN 2035-1775.
- [15] Aslan, N. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling and optimization of a multi-gravity separator for chromite concentration. Volume 185, Issue 1, 10 June 2008, Pages 80–86. doi:10.1016/j.powtec.2007.10.002.
- [16] Myers, R. H.; Montgomery, D. C.; Anderson-Cook, C. M. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. 3rd Ed. New York: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-17446-3.

Mendonça, R. S. **Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal**

[17] Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments: Response Surface Method and Designs. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2005. ISSN: ????

[18] Anderson-Cook, C.M.; Borror, C.M.; Montgomery, D.C., Response surface design evaluation and comparison. Journal of Statistical Planning and Inference, Volume 139, Issue 2, 1 February 2009, Pages 629–641. doi:10.1016/j.jspi.2008.04.004.

[19] Morshedi, A; Akbarian, M. Application of response surface methodology: design of experiments and optimization: a mini review. Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences, Vol. 4 (S4), pp. 2434-2439, 2014, ISSN: 2231– 6345 (Online).

[20] Candiotti, L.V.; De Zan, M.M.; Cámara M.S.; Goicoechea, C.H. Experimental design and multiple response optimization. Using the desirability function in analytical methods development, Talanta 124 (2014) 123–138. doi:10.1016/j.talanta.2014.01.034

[21] Al-Baali, M. and Khalfan, H. A combined class of self-scaling and modified quasi-Newton methods. Computational Optimization and Applications Volume 52 Issue 2, June, 393-408, 2012. Doi:10.1007/s10589-011-9415-1.

[22] Ballirano, P.; Melis, E. Thermal behaviour and kinetics of dehydration in air of bassanite, calcium sulphate hemihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), from X-ray powder diffraction. Eur. J. Mineral. 2009, 21, 985–993. DOI: 10.1127/0935-1221/2009/0021-1973.

Normas Para Submissão em Periódico Internacional

Powder Technology

GUIDE FOR AUTHORS

INTRODUCTION

It is now possible to submit your paper online and benefit from the considerably shorter time required to reach an editorial decision about publication. For all further information, please go to the journal's homepage on <http://www.elsevier.com/locate/powtec>.

Types of Paper

- **Normal length research papers** - these should be complete & authoritative accounts of work which has a special significance and must be presented clearly and concisely.
- **Review articles** - these will normally be commissioned by one of the Editors. Prospective authors of a review article should consult with one of the Editors to check the suitability of their topic & material before submitting their review.
- **Short communications** - will be accepted for the early communication of important and original advances. Such accounts may be of a preliminary nature but should always be complete and should not exceed the equivalent of 3000 words, including figures and tables.
- The journal also publishes **Letters to the editors** (commenting on work published in the journal) and **Book reviews**.

Contact Details for Submission

Professor L.-S. Fan
Ohio State University
Department of Chemical Engineering
140 West 19th Avenue
Columbus, OH 43210-1180
USA
Tel: +1 (614) 292 6591
Fax: +1 (614) 292 3769
fan@che.eng.ohio-state.edu

BEFORE YOU BEGIN

Ethics in publishing

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <https://www.elsevier.com/publishingethics> and <https://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Conflict of interest

All authors are requested to disclose any actual or potential conflict of interest including any financial, personal or other relationships with other people or organizations within three years of beginning the submitted work that could inappropriately influence, or be perceived to influence, their work. See also <https://www.elsevier.com/conflictsofinterest>. Further information and an example of a Conflict of Interest form can be found at: http://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/286/supporthub/publishing.

Submission declaration and verification

Submission of an article implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <https://www.elsevier.com/sharingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. To verify originality, your article may be checked by the originality detection service CrossCheck <https://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

Changes to authorship

Authors are expected to consider carefully the list and order of authors **before** submitting their manuscript and provide the definitive list of authors at the time of the original submission. Any addition, deletion or rearrangement of author names in the authorship list should be made only **before** the manuscript has been accepted and only if approved by the journal Editor. To request such a change, the Editor must receive the following from the **corresponding author**: (a) the reason for the change in author list and (b) written confirmation (e-mail, letter) from all authors that they agree with the addition, removal or rearrangement. In the case of addition or removal of authors, this includes confirmation from the author being added or removed.

Only in exceptional circumstances will the Editor consider the addition, deletion or rearrangement of authors **after** the manuscript has been accepted. While the Editor considers the request, publication of the manuscript will be suspended. If the manuscript has already been published in an online issue, any requests approved by the Editor will result in a corrigendum.

Copyright

Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete a 'Journal Publishing Agreement' (for more information on this and copyright, see <https://www.elsevier.com/copyright>). An e-mail will be sent to the corresponding author confirming receipt of the manuscript together with a 'Journal Publishing Agreement' form or a link to the online version of this agreement.

Subscribers may reproduce tables of contents or prepare lists of articles including abstracts for internal circulation within their institutions. Permission of the Publisher is required for resale or distribution outside the institution and for all other derivative works, including compilations and

translations (please consult <https://www.elsevier.com/permissions>). If excerpts from other copyrighted works are included, the author(s) must obtain written permission from the copyright owners and credit the source(s) in the article. Elsevier has preprinted forms for use by authors in these cases: please consult <https://www.elsevier.com/permissions>.

For open access articles: Upon acceptance of an article, authors will be asked to complete an 'Exclusive License Agreement' (for more information see <https://www.elsevier.com/OAauthoragreement>). Permitted third party reuse of open access articles is determined by the author's choice of user license (see <https://www.elsevier.com/openaccesslicenses>).

Author rights

As an author you (or your employer or institution) have certain rights to reuse your work. For more information see <https://www.elsevier.com/copyright>.

Role of the funding source

You are requested to identify who provided financial support for the conduct of the research and/or preparation of the article and to briefly describe the role of the sponsor(s), if any, in study design; in the collection, analysis and interpretation of data; in the writing of the report; and in the decision to submit the article for publication. If the funding source(s) had no such involvement then this should be stated.

Funding body agreements and policies

Elsevier has established a number of agreements with funding bodies which allow authors to comply with their funder's open access policies. Some authors may also be reimbursed for associated publication fees. To learn more about existing agreements please visit <https://www.elsevier.com/fundingbodies>.

Open access

This journal offers authors a choice in publishing their research:

Open access

- Articles are freely available to both subscribers and the wider public with permitted reuse
- An open access publication fee is payable by authors or on their behalf e.g. by their research funder or institution

Subscription

- Articles are made available to subscribers as well as developing countries and patient groups through our universal access programs (<https://www.elsevier.com/access>).

- No open access publication fee payable by authors.

Regardless of how you choose to publish your article, the journal will apply the same peer review criteria and acceptance standards.

For open access articles, permitted third party (re)use is defined by the following Creative Commons user licenses: *Creative Commons Attribution (CC BY)*

Lets others distribute and copy the article, create extracts, abstracts, and other revised versions, adaptations or derivative works of or from an article (such as a translation), include in a collective work (such as an anthology), text or data mine the article, even for commercial purposes, as long as they credit the author(s), do not represent the author as endorsing their adaptation of the article, and do not modify the article in such a way as to damage the author's honor or reputation.

Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs (CC BY-NC-ND)

For non-commercial purposes, lets others distribute and copy the article, and to include in a collective work (such as an anthology), as long as they credit the author(s) and provided they do not alter or modify the article.

The open access publication fee for this journal is **USD 2750**, excluding taxes. Learn more about Elsevier's pricing policy: <http://www.elsevier.com/openaccesspricing>.

Green open access

Authors can share their research in a variety of different ways and Elsevier has a number of green open access options available. We recommend authors see our green open access page for further information (<http://elsevier.com/greenopenaccess>). Authors can also self-archive their manuscripts immediately and enable public access from their institution's repository after an embargo period. This is the version that has been accepted for publication and which typically includes author-incorporated changes suggested during submission, peer review and in editor-author communications. Embargo period: For subscription articles, an appropriate amount of time is needed for journals to deliver value to subscribing customers before an article becomes freely available to the public. This is the embargo period and it begins from the date the article is formally published online in its final and fully citable form.

This journal has an embargo period of 24 months.

Language (usage and editing services)

Please write your text in good English (American or British usage is accepted, but not a mixture of these). Authors who feel their English language manuscript may require editing to eliminate possible grammatical or spelling errors and to conform to correct scientific English may wish to use the English Language Editing service available from Elsevier's WebShop (<http://webshop.elsevier.com/languageediting/>) or visit our customer support site (<http://support.elsevier.com>) for more information.

Submission

Our online submission system guides you stepwise through the process of entering your article details and uploading your files. The system converts your article files to a single PDF file used in the peer-review process. Editable files (e.g., Word, LaTeX) are required to typeset your article for final publication. All correspondence, including notification of the Editor's decision and requests for revision, is sent by e-mail.

Referees

Powder Technology authors are required to provide the names, affiliations and e-mails of, at least, 5 referees who are excited with this research topic to be willing to volunteer their time in assessing the novelty and quality of the submitted manuscript.

Authors must adhere to the following:

* Each suggested referee cannot be a current or former colleague or employee, or a collaborator within the past 10 years.

* At least two of the referees must have published unique articles in Powder Technology during the past 10 years, preferably on a topic similar to that of the submitted manuscript. Exceptions can be made for manuscripts in non-traditional areas where two additional referees (total 7) should be given.

* Justify the selection of each referee by explicitly stating the referee's expertise in connection to the paper. Example: "Dr. XYZ is an expert on solving population balance equations and pharmaceutical process design while he has published in Powder Technology in 2015 and 2013".

Note that following the standard in the scientific community, editors retain the sole right to decide whether or not the suggested referees are used.

Perspectives Section

This section is a forum to address various important aspects of the particle technology field. These brief articles will reflect on the state of the art in particle technology, offer in-depth analysis of historical approaches, and consider the potential of various techniques, theories, and emerging areas of significance. This compact presentation of information should allow the reader to gain a good idea of the subject matter in a short time.

Length and style of contributions:

- Brief articles, limited to 3000 words
- References and figures should be easy to read, informative and interesting to experts and non-specialists.

Ideally, manuscripts will be proofread for clarity as well as grammatical correctness prior to initial submission. Submission of contributions: Perspectives manuscripts will be coordinated and handled by L.-S. Fan, and suggestions for Perspectives authors should be directed to him.

PREPARATION

Use of word processing software

It is important that the file be saved in the native format of the word processor used. The text should be in single-column format. Keep the layout of the text as simple as possible. Most formatting codes will be removed and replaced on processing the article. In particular, do not use the word processor's options to justify text or to hyphenate words. However, do use bold face, italics, subscripts, superscripts etc. When preparing tables, if you are using a table grid, use only one grid for each individual table and not a grid for each row. If no grid is used, use tabs, not spaces, to align columns. The electronic text should be prepared in a way very similar to that of conventional manuscripts (see also the Guide to Publishing with Elsevier: <https://www.elsevier.com/guidepublication>). Note that source files of figures, tables and text graphics will be required whether or not you embed your figures in the text. See also the section on Electronic artwork.

To avoid unnecessary errors you are strongly advised to use the 'spell-check' and 'grammar-check' functions of your word processor.

LaTeX

You are recommended to use the Elsevier article class *elsarticle.cls* (<http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/elsarticle>) to prepare your manuscript and BibTeX (<http://www.bibtex.org>) to generate your bibliography.

For detailed submission instructions, templates and other information on LaTeX, see <https://www.elsevier.com/latex>.

Article structure

Subdivision - numbered sections

Divide your article into clearly defined and numbered sections. Subsections should be numbered

1.1 (then 1.1.1, 1.1.2, ...), 1.2, etc. (the abstract is not included in section numbering). Use this numbering also for internal cross-referencing: do not just refer to 'the text'. Any subsection may be given a brief heading. Each heading should appear on its own separate line.

Introduction

State the objectives of the work and provide an adequate background, avoiding a detailed literature survey or a summary of the results.

Material and methods

Provide sufficient detail to allow the work to be reproduced. Methods already published should be indicated by a reference: only relevant modifications should be described.

Theory/calculation

A Theory section should extend, not repeat, the background to the article already dealt with in the Introduction and lay the foundation for further work. In contrast, a Calculation section represents a practical development from a theoretical basis.

Results

Results should be clear and concise.

Discussion

This should explore the significance of the results of the work, not repeat them. A combined Results and Discussion section is often appropriate. Avoid extensive citations and discussion of published literature.

Conclusions

The main conclusions of the study may be presented in a short Conclusions section, which may stand alone or form a subsection of a Discussion or Results and Discussion section.

Appendices

If there is more than one appendix, they should be identified as A, B, etc. Formulae and equations in appendices should be given separate numbering: Eq. (A.1), Eq. (A.2), etc.; in a subsequent appendix, Eq. (B.1) and so on. Similarly for tables and figures: Table A.1; Fig. A.1, etc.

Vitae

Include in the manuscript a short (maximum 100 words) biography of each author, along with a passport-type photograph accompanying the other figures.

Essential title page information

- **Title.** Concise and informative. Titles are often used in information-retrieval systems. Avoid abbreviations and formulae where possible.
- **Author names and affiliations.** Please clearly indicate the given name(s) and family name(s) of each author and check that all names are accurately spelled. Present the authors' affiliation addresses (where the actual work was done) below the names. Indicate all affiliations with a lower- case superscript letter immediately after the author's name and in front of the appropriate address. Provide the full postal address of each affiliation, including the country name and, if available, the e-mail address of each author.
- **Corresponding author.** Clearly indicate who will handle correspondence at all stages of refereeing and publication, also post-publication. **Ensure that the e-mail address is given and that contact details are kept up to date by the corresponding author.**
- **Present/permanent address.** If an author has moved since the work described in the article was done, or was visiting at the time, a 'Present address' (or 'Permanent address') may be indicated as a footnote to that author's name. The address at which the author actually did the work must be retained as the main, affiliation address. Superscript Arabic numerals are used for such footnotes.

Abstract

A concise and factual abstract is required. The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions. An abstract is often presented separately from the article, so it must be able to stand alone. For this reason, References should be avoided, but if essential, then cite the author(s) and year(s). Also, non-standard or uncommon abbreviations should be avoided, but if essential they must be defined at their first mention in the abstract itself.

Graphical abstract

A Graphical abstract is mandatory for this journal. It should summarize the contents of the paper in a concise, pictorial form designed to capture the attention of a wide readership online. Authors must provide images that clearly represent the work described in the paper. Graphical abstracts should be submitted as a separate file in the online submission system. Maximum image size: 400 × 600 pixels (h × w, recommended size 200 × 500 pixels). Preferred file types: TIFF, EPS or MS Office files. See <http://www.elsevier.com/graphicalabstracts> for examples.

Highlights

Highlights are mandatory for this journal. They consist of a short collection of bullet points that convey the core findings of the article and should be submitted in a separate editable file in the online submission system. Please use 'Highlights' in the file name and include 3 to 5 bullet points (maximum 85 characters, including spaces, per bullet point). See <https://www.elsevier.com/highlights> for examples.

Keywords

Immediately after the abstract, provide a maximum of 6 keywords, using British spelling and avoiding general and plural terms and multiple concepts (avoid, for example, 'and', 'of'). Be sparing with abbreviations: only abbreviations firmly established in the field may be eligible. These keywords will be used for indexing purposes.

Abbreviations

Define abbreviations that are not standard in this field in a footnote to be placed on the first page of the article. Such abbreviations that are unavoidable in the abstract must be defined at their first mention there, as well as in the footnote. Ensure consistency of abbreviations throughout the article.

Acknowledgements

Collate acknowledgements in a separate section at the end of the article before the references and do not, therefore, include them on the title page, as a footnote to the title or otherwise. List here those individuals who provided help during the research (e.g., providing language help, writing assistance or proof reading the article, etc.).

Math formulae

Please submit math equations as editable text and not as images. Present simple formulae in line with normal text where possible and use the solidus (/) instead of a horizontal line for small fractional terms, e.g., X/Y. In principle, variables are to be presented in italics. Powers of e are often more conveniently denoted by exp. Number consecutively any equations that have to be displayed separately from the text (if referred to explicitly in the text).

Footnotes

Footnotes should be used sparingly. Number them consecutively throughout the article. Many word processors can build footnotes into the text, and this feature may be used. Otherwise, please indicate the position of footnotes in the text and list the footnotes themselves separately at the end of the article. Do not include footnotes in the Reference list.

Artwork

Electronic artwork

General points

- Make sure you use uniform lettering and sizing of your original artwork.
- Embed the used fonts if the application provides that option.
- Aim to use the following fonts in your illustrations: Arial, Courier, Times New Roman, Symbol, or use fonts that look similar.
- Number the illustrations according to their sequence in the text.
- Use a logical naming convention for your artwork files.
- Provide captions to illustrations separately.
- Size the illustrations close to the desired dimensions of the published version.
- Submit each illustration as a separate file.

A detailed guide on electronic artwork is available on our website:

<https://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

You are urged to visit this site; some excerpts from the detailed information are given here.

Formats

If your electronic artwork is created in a Microsoft Office application (Word, PowerPoint, Excel) then please supply 'as is' in the native document format.

Regardless of the application used other than Microsoft Office, when your electronic artwork is finalized, please 'Save as' or convert the images to one of the following formats (note the resolution requirements for line drawings, halftones, and line/halftone combinations given below):

EPS (or PDF): Vector drawings, embed all used fonts.

TIFF (or JPEG): Color or grayscale photographs (halftones), keep to a minimum of 300 dpi.

TIFF (or JPEG): Bitmapped (pure black & white pixels) line drawings, keep to a minimum of 1000 dpi.

TIFF (or JPEG): Combinations bitmapped line/half-tone (color or grayscale), keep to a minimum of 500 dpi.

Please do not:

- Supply files that are optimized for screen use (e.g., GIF, BMP, PICT, WPG); these typically have a low number of pixels and limited set of colors;
- Supply files that are too low in resolution;
- Submit graphics that are disproportionately large for the content.

Color artwork

Please make sure that artwork files are in an acceptable format (TIFF (or JPEG), EPS (or PDF), or MS Office files) and with the correct resolution. If, together with your accepted article, you submit usable color figures then Elsevier will ensure, at no additional charge, that these figures will appear in color online (e.g., ScienceDirect and other sites) regardless of whether or not these illustrations are reproduced in color in the printed version. **For color reproduction in print, you will receive information regarding the costs from Elsevier after receipt of your accepted article.** Please indicate your preference for color: in print or online only. For further information on the preparation of electronic artwork, please see <https://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

Figure captions

Ensure that each illustration has a caption. Supply captions separately, not attached to the figure. A caption should comprise a brief title (**not** on the figure itself) and a description of the illustration. Keep text in the illustrations themselves to a minimum but explain all symbols and abbreviations used.

Tables

Please submit tables as editable text and not as images. Tables can be placed either next to the relevant text in the article, or on separate page(s) at the end. Number tables consecutively in accordance with their appearance in the text and place any table notes below the table body. Be sparing in the use of tables and ensure that the data presented in them do not duplicate results described elsewhere in the article. Please avoid using vertical rules.

References

Citation in text

Please ensure that every reference cited in the text is also present in the reference list (and vice versa). Any references cited in the abstract must be given in full. Unpublished results and personal communications are not recommended in the reference list, but may be mentioned in the text. If these references are included in the reference list they should follow the standard reference style of the journal and should include a substitution of the publication date with either 'Unpublished results' or

'Personal communication'. Citation of a reference as 'in press' implies that the item has been accepted for publication.

Web references

As a minimum, the full URL should be given and the date when the reference was last accessed. Any further information, if known (DOI, author names, dates, reference to a source publication, etc.), should also be given. Web references can be listed separately (e.g., after the reference list) under a different heading if desired, or can be included in the reference list.

References in a special issue

Please ensure that the words 'this issue' are added to any references in the list (and any citations in the text) to other articles in the same Special Issue.

Reference management software

Most Elsevier journals have their reference template available in many of the most popular reference management software products. These include all products that support Citation Style Language styles (<http://citationstyles.org>), such as Mendeley (<http://www.mendeley.com/features/reference-manager>) and Zotero (<https://www.zotero.org/>), as well as

EndNote (<http://endnote.com/downloads/styles>). Using the word processor plug-ins from these products, authors only need to select the appropriate journal template when preparing their article, after which citations and bibliographies will be automatically formatted in the journal's style. If no template is yet available for this journal, please follow the format of the sample references and citations as shown in this Guide.

Users of Mendeley Desktop can easily install the reference style for this journal by clicking the following link:

<http://open.mendeley.com/use-citation-style/powder-technology>

When preparing your manuscript, you will then be able to select this style using the Mendeley plug-ins for Microsoft Word or LibreOffice.

Reference style

Text: Indicate references by number(s) in square brackets in line with the text. The actual authors can be referred to, but the reference number(s) must always be given.

Example: '..... as demonstrated [3,6]. Barnaby and Jones [8] obtained a different result'

List: Number the references (numbers in square brackets) in the list in the order in which they appear in the text.

Examples:

Reference to a journal publication:

[1] J. van der Geer, J.A.J. Hanraads, R.A. Lupton, The art of writing a scientific article, J. Sci. Commun. 163 (2010) 51–59.

Reference to a book:

[2] W. Strunk Jr., E.B. White, The Elements of Style, fourth ed., Longman, New York, 2000.

Reference to a chapter in an edited book:

[3] G.R. Mettam, L.B. Adams, How to prepare an electronic version of your article, in: B.S. Jones, R.Z. Smith (Eds.), Introduction to the Electronic Age, E-Publishing Inc., New York, 2009, pp. 281–304.

Journal abbreviations source

Journal names should be abbreviated according to the List of Title Word Abbreviations:

<http://www.issn.org/services/online-services/access-to-the-ltwa/>.

Video data

Elsevier accepts video material and animation sequences to support and enhance your scientific research. Authors who have video or animation files that they wish to submit with their article are strongly encouraged to include links to these within the body of the article. This can be done in the same way as a figure or table by referring to the video or animation content and noting in the body text where it should be placed. All submitted files should be properly labeled so that they directly relate to the video file's content. In order to ensure that your video or animation material is directly usable, please provide the files in one of our recommended file formats with a preferred maximum size of 150 MB. Video and animation files supplied will be published online in the electronic version of your article in Elsevier Web products, including ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>. Please supply 'stills' with your files: you can choose any frame from the video or animation or make a separate image. These will be used instead of standard icons and will personalize the link to your video data. For more detailed instructions please visit our video instruction pages at <https://www.elsevier.com/artworkinstructions>. Note: since video and animation cannot be embedded in the print version of the journal, please provide

text for both the electronic and the print version for the portions of the article that refer to this content.

AudioSlides

The journal encourages authors to create an AudioSlides presentation with their published article. AudioSlides are brief, webinar-style presentations that are shown next to the online article on ScienceDirect. This gives authors the opportunity to summarize their research in their own words and to help readers understand what the paper is about. More information and examples are available at <https://www.elsevier.com/audioslides>. Authors of this journal will automatically receive an invitation e-mail to create an AudioSlides presentation after acceptance of their paper.

Supplementary material

Supplementary material can support and enhance your scientific research. Supplementary files offer the author additional possibilities to publish supporting applications, high-resolution images, background datasets, sound clips and more. Please note that such items are published online exactly as they are submitted; there is no typesetting involved (supplementary data supplied as an Excel file or as a PowerPoint slide will appear as such online). Please submit the material together with the article and supply a concise and descriptive caption for each file. If you wish to make any changes to supplementary data during any stage of the process, then please make sure to provide an updated file, and do not annotate any corrections on a previous version. Please also make sure to switch off the 'Track Changes' option in any Microsoft Office files as these will appear in the published supplementary file(s). For more detailed instructions please visit our artwork instruction pages at <https://www.elsevier.com/artworkinstructions>.

Interactive MATLAB Figure Viewer

This journal features the Interactive MATLAB Figure Viewer, allowing you to display figures created in MATLAB in the .FIG format in an interactive viewer next to the article. Please go to <https://www.elsevier.com/matlab> for more information and submission instructions.

Interactive plots

This journal enables you to show an Interactive Plot with your article by simply submitting a data file. For instructions please go to <https://www.elsevier.com/interactiveplots>.

Submission checklist

The following list will be useful during the final checking of an article prior to sending it to the journal for review. Please consult this Guide for Authors for further details of any item.

Ensure that the following items are present:

One author has been designated as the corresponding author with contact details:

- E-mail address
- Full postal address

All necessary files have been uploaded, and contain:

- Keywords
 - All figure captions
 - All tables (including title, description, footnotes)
- Further considerations

- Manuscript has been 'spell-checked' and 'grammar-checked'
- References are in the correct format for this journal
- All references mentioned in the Reference list are cited in the text, and vice versa
- Permission has been obtained for use of copyrighted material from other sources (including the Internet)

Printed version of figures (if applicable) in color or black-and-white

- Indicate clearly whether or not color or black-and-white in print is required.

For any further information please visit our customer support site at <http://support.elsevier.com>.

AFTE ACCEPTANCE

Use of the Digital Object Identifier

The Digital Object Identifier (DOI) may be used to cite and link to electronic documents. The DOI consists of a unique alpha-numeric character string which is assigned to a document by the publisher upon the initial electronic publication. The assigned DOI never changes. Therefore, it is an ideal medium for citing a document, particularly 'Articles in press' because they have not yet received their full bibliographic information. Example of a correctly given DOI (in URL format; here an article in the journal *Physics Letters B*): <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2010.09.059>

When you use a DOI to create links to documents on the web, the DOIs are guaranteed never to change.

Online proof correction

Corresponding authors will receive an e-mail with a link to our online proofing system, allowing annotation and correction of proofs online. The environment is similar to MS Word: in addition to editing text, you can also comment on figures/tables and answer questions from the Copy Editor. Web-based proofing provides a faster and less error-prone process by allowing you to directly type your corrections, eliminating the potential introduction of errors.

If preferred, you can still choose to annotate and upload your edits on the PDF version. All instructions for proofing will be given in the e-mail we send to authors, including alternative methods to the online version and PDF.

We will do everything possible to get your article published quickly and accurately. Please use this proof only for checking the typesetting, editing, completeness and correctness of the text, tables and figures. Significant changes to the article as accepted for publication will only be

considered at this stage with permission from the Editor. It is important to ensure that all corrections are sent back to us in one communication. Please check carefully before replying, as inclusion of any subsequent corrections cannot be guaranteed. Proofreading is solely your responsibility.

Offprints

The corresponding author, at no cost, will be provided with a personalized link providing 50 days free access to the final published version of the article on [ScienceDirect](#). This link can also be used for sharing via email and social networks. For an extra charge, paper offprints can be ordered via the offprint order form which is sent once the article is accepted for publication. Both corresponding and co-authors may order offprints at any time via Elsevier's WebShop (<http://webshop.elsevier.com/myarticleservices/offprints>).

Authors requiring printed copies of multiple articles may use Elsevier WebShop's 'Create Your Own Book' service to collate multiple articles within a single cover (<http://webshop.elsevier.com/myarticleservices/booklets>).

AUTHOR NQUIRIES

You can track your submitted article at <https://www.elsevier.com/track-submission>. You can track your accepted article at <https://www.elsevier.com/trackarticle>. You are also welcome to contact Customer Support via <http://support.elsevier.com>.

Mendonça, R. S. Desidratação Térmica de Resíduos de Placas de Gesso em Forno Contínuo de Elemento Móvel Helicoidal

Depósito de Patente

 14/01/2015 01815000012 13:45 REPE  BR 10 2015 000631 7	Espaço reservado para a etiqueta	Espaço reservado para o código QR
--	----------------------------------	-----------------------------------



INPI
 INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
 Sistema de Gestão da Qualidade
 Diretoria de Patentes

DIRPA	Tipo de Documento: Formulário	DIRPA	Página: 1/3
Título do Documento: Depósito de Pedido de Patente	Código: PQ001	Procedimento: DIRPA-PQ006	Versão: 2

Ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial:

O requerente solicita a concessão de um privilégio na natureza e nas condições abaixo indicadas:

1. Depositante (71):

- 1.1 Nome: VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS
 1.2 Qualificação: QUÍMICO INDUSTRIAL
 1.3 CNPJ/CPF: 079743104-72
 1.4 Endereço Completo: RUA LEONARDO DA VINCE, 112 APT. 2121 IMBIRIBEIRA RECIFE-PE
 1.5 CEP: 51190-350
 1.6 Telefone: (81) 9962-0732 1.7 Fax: (81) 3339-0523
 1.8 E-mail: valdemir.alexandre@hotmail.com

continua em folha anexa

- 2. Natureza:** Invenção Modelo de Utilidade Certificado de Adição

3. Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54):

PROCESSO DE PRODUÇÃO DE SEMI-HIDRATO BETA RECICLÁVEL A PARTIR DE RESÍDUOS DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO

continua em folha anexa

- 4. Pedido de Divisão: do pedido Nº** **Data de Depósito:**

- 5. Prioridade:** Interna (66) Unionista (30)

O depositante reivindica a(s) seguinte(s):

País ou Organização do depósito	Número do depósito (se disponível)	Data de depósito

continua em folha anexa