

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS NA DESIDRATAÇÃO DA GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA RECICLÁVEL

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE

POR

ARIOSTO RODRIGUES MONÇÃO JÚNIOR

ORIENTADORES:

PROF. DR. VALDEMIR ALEXANDRE DOS SANTOS

PROF. DR. ROMILDE ALMEIDA DE OLIVEIRA

RECIFE, 09 DE JANEIRO DE 2008

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS NA DESIDRATAÇÃO DA GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA RECICLÁVEL

Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, orientada pelo Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos e Prof. Dr. Romilde Almeida Oliveira.

RECIFE, 09 DE JANEIRO DE 2008

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

PRÓ-REITORIA ACADÊMICA – PRAC

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO
DE MESTRADO DE**

ARIOSTO RODRIGUES MONÇÃO JÚNIOR

**“OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS NA DESIDRATAÇÃO DA
GIPSITA PARA OBTENÇÃO DE UM GESSO BETA RECICLÁVEL”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Materiais de Construção Civil

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato _____.

Recife, 09 de Janeiro de 2008.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Joaquim Teodoro Romão de Oliveira

Prof. Dr. Carlos da Costa Dantas

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre me incentivaram e me apoiaram a conquistar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Não poderia de deixar de agradecer e mostrar minha gratidão a todos que contribuíram para essa grande conquista: o Título de Mestre.

Desta forma, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos, não existindo ordem de importância das pessoas, por que todos somaram de alguma maneira nos diversos momentos ao longo destes meses.

A Deus, meu grande guia a todos os momentos.

A minha família que propiciou as diretrizes necessárias para meu crescimento e formação.

Ao meu orientador Valdemir Alexandre dos Santos, pela confiança e reconhecimento do meu trabalho desde o início, através de uma orientação competente, provedora de conhecimentos e paciência nos momentos de dúvidas e incertezas, durante toda a sua realização.

Ao meu Co-orientador e Coordenador do Mestrado de Engenharia Civil da UNICAP Romilde Almeida que deu todo auxílio necessário para confecção deste trabalho.

Aos professores do Mestrado de Engenharia Civil da UNICAP Arnaldo Cardim, Maria da Graça, Eliane Barreto, Robson Pequeno, Joaquim Teodoro, Silvio Romero, Beda Barkokebas que me apresentaram novos conhecimentos para o longo de mais esta etapa da minha vida.

Aos amigos do mestrado pela amizade, companheirismo, ajuda, paciência e incentivo em tantas conversas, trabalhos em conjunto e momentos inesquecíveis durante o curso.

EPÍGRAFE

“Na natureza nada se perde, nada se cria, tudo se transforma”.

(Antoine Laurent Lavoisier)

RESUMO

Foram determinadas condições operacionais ótimas para produção de gesso beta reciclável a partir do controle da pressão e da temperatura de calcinação do minério de gipsita. O gesso atualmente não possui, oficialmente, técnicas reconhecidas de reciclabilidade ou de reaproveitamento. Contudo, a posição ocupada pelo gesso de uma das maiores riquezas potenciais para o Estado de Pernambuco, solicita esforços no desenvolvimento de processos produtivos voltados para a posição de importante material de construção por parte do gesso. Para identificação da qualidade do gesso reciclado foram testadas as propriedades: dureza, massa unitária e módulo de resistência à flexão. Foi adotado um planejamento experimental do tipo 3^2 , com os resultados gerados sendo estudados com a aplicação do método de análise de superfícies de respostas. Um modelo matemático do tipo quadrático ajustou-se bem aos dados experimentais, permitindo uma indiscutível visualização das condições ótimas do processo. Fotografias da microestrutura do gesso produzido pelo processo proposto, com auxílio de um microscópio de varredura eletrônica, calibrado para um fator de ampliação da ordem de 3700 vezes, mostraram a formação de cristais alongados, responsáveis por uma microestrutura que garante propriedades semelhantes ou melhores que as da microestrutura de origem para os gessos formados e hidratados. A projeção das curvas de níveis no diagrama de contornos mostrou uma baixíssima interação entre os fatores estudados. A região de condições ótimas foi identificada em torno de 0,6 atmosfera manométrica e 170°C.

Palavras-chave: Reciclagem, Material de construção, Microestrutura do gesso, Método da superfície de resposta, Otimização de processos.

ABSTRACT

Optimized operational conditions for recycled beta plaster production had been determined with aid of pressure and temperature controls of gypsum ore dehydration process. Plaster currently does not possess, officially, recognized techniques of recycling or reuse. For identification of the quality of recycled plaster the properties had been tested: hardness, unit mass and flexion strength module. An experimental design of 3^2 type was adopted, with the generated results being studied with aid of the response surfaces method. A mathematical model of the quadratic type was adjusted well to the experimental data, allowing an unquestionable visualization of the process optimized conditions. Photographs of the microstructure of the produced plaster, obtained in a scanning electronic microscopy, with factor of magnifying of the order of 3700 times, had shown the crystal formation prolonged and responsible for a microstructure that guarantees similar properties or better that of the microstructure of origin for formed plasters and hydrated. The projection of the levels curves in the contours diagram showed to one very small interaction between the studied factors. The region of excellent conditions was identified around 0,6 manometric atmosphere and 170°C.

Key words: Recycling, Construction material, Plaster microstructure, Response surfaces method, Process optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1	Pólo Gesseiro do Araripe	15
2.2	Obtenção do Gesso por Desidratação Térmica	16
2.3	Microestrutura do Gesso	20
2.4	Fornos de Desidratação	22
2.5	Fornos do Pólo Gesseiro do Araripe	36
2.6	Propriedades e Aplicações do Gesso	37
2.7	Reciclagem do Gesso	37
3	MATERIAL E MÉTODOS	40
3.1	Descrição Sucinta do Arranjo Experimental	40
3.2	Planejamento dos Experimentos	42
3.3	Microestrutura do Gesso Produzido	44
3.4	Propriedades do Gesso Produzido	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	57
	BIBLIOGRAFIA	58

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.2 – VALORES ASSOCIADOS AOS NÍVES PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL ADOTADO	43
TABELA 3.4 – EXIGÊNCIAS COM RELAÇÃO ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO GESSO PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	46
TABELA 4.0 – VALORES ASSOCIADOS AOS NÍVES PARA O PLANEJAMENTO FATORIAL 2³.....	46
TABELA 4.1 – PARÂMETROS DA ANOVA PARA MASSA UNITÁRIA.....	46
TABELA 4.2 – PARÂMETROS DA ANOVA PARA RESISTÊNCIA A FLEXÃO.....	52
TABELA 4.3 – PARÂMETROS DA ANOVA PARA DUREZA.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - TEMPO DE REHIDRATAÇÃO DE UM GESSO ANIDRO	17
FIGURA 2 - TEMPO DE DESIDRATAÇÃO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO DO GRÃO DE GIPSITA. 19	19
FIGURA 3 - ESQUEMA DA COMPOSIÇÃO DE UM PEDAÇO DE GIPSITA CALCINADO	19
FIGURA 4 - TEMPERATURA E ENERGIA DE DESIDRATAÇÃO DA GIPSITA	20
FIGURA 5 – ETAPAS DE HIDATAÇÃO DO GESSO.....	21
FIGURA 6 - FORNO TIPO FOGÃO DE GESSO.....	22
FIGURA 7 - FORNO VERTICAL	23
FIGURA 8 - FORNO VERTICAL TIPO “ ALPHAPLATRE”	24
FIGURA 9 - FORNO ROTATIVO PARA PRODUÇÃO DE ANIDRITA	25
FIGURA 10 - FORNO ROTATIVO DE FLUXO CONCORRENTE.....	26
FIGURA 11 - FORNO ROTATIVO COM TROCADOR DE CALOR CONCÊNTRICO.....	27
FIGURA 12 - FORNO DO TIPO SOLA	28
FIGURA 13 - FORNO MARMITA VERTICAL	29
FIGURA 14 - FORNO MARMITA HORIZONTAL (BEAU).....	31
FIGURA 15 - CALCINADOR RÁPIDO (FLASH)	32
FIGURA 16 - MOINHO CALCINADOR CLAUDIUS PETERS	33
FIGURA 17- CICLONE CALCINADOR GRELBEX	34
FIGURA 18 – FORNO A LEITO FLUIDIZADO MÓVEL	35
FIGURA 19 - REATOR DO TIPO AUTOCLAVE PARA PRODUÇÃO DE GESSO BETA RECICLÁVEL EM ESCALA DE BANCADA	40

FIGURA 20 - ESTUFA COM CONTROLE DIGITAL DE TEMPERATURA UTILIZADA COMO FONTE DE CALOR PARA REAÇÃO DE DESIDRATAÇÃO TÉRMICA QUE OCORRE NO FORNO - AUTOCLAVE	41
FIGURA 21- MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA DO NPCIAMB DA UNIVERSIDADE CÁTOLICA DE PERNAMBUCO	45
FIGURA 22 - CRISTAIS DE GESSO PRODUZIDOS SOB CONTROLE DE PRESSÃO E TEMPERATURA.....	47
FIGURA 23 - CRISTAIS DE GESSO PRODUZIDO SEM CONTROLE DE PRESSÃO	48
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E EXPERIMENTAIS: MASSA UNITÁRIA	50
FIGURA 25 - CURVAS DE NÍVEL: MASSA UNITÁRIA	51
FIGURA 26 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA:MASSA UNITÁRIA	51
FIGURA 27 - DIAGRAMA DE PARETO: MASSA UNITÁRIA	52
FIGURA 28 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E EXPERIMENTAIS: RESISTÊNCIA À FLEXÃO	53
FIGURA 29 - CURVAS DE NÍVEL: RESISTÊNCIA FLEXÃO	53
FIGURA 30 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	54
FIGURA 31 - DIAGRAMA DE PARETO:RESISTÊNCIA À FLEXÃO.....	54
FIGURA 32 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES SIMULADOS E EXPERIMENTAIS: DUREZA	55
FIGURA 33 - CURVAS DE NÍVEL: DUREZA.....	55
FIGURA 34 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA: DUREZA	56
FIGURA 35 - DIAGRAMA DE PARETO: DUREZA.....	56

1 INTRODUÇÃO

Desenvolvimento sustentável é aquele que consegue utilizar os recursos naturais disponíveis para atender as necessidades das gerações presentes sem comprometer as possibilidades das gerações futuras atenderem as suas necessidades. Reciclagem é um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os detritos e reutilizá-los no ciclo de produção de que saíram. É o resultado de uma série de atividades, pelas quais materiais que se tornariam lixo, ou estão no lixo, são desviados, coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de novos produtos. As indústrias recicladoras são também chamadas secundárias, por processarem matéria-prima de recuperação. Na maior parte dos processos, o produto reciclado é completamente diferente do produto inicial (AGUIAR, 2004).

A reciclagem de resíduos na construção civil é uma das condições básicas para se atingir um desenvolvimento sustentável neste setor. A construção civil consome entre 14% e 50% dos recursos naturais extraídos do Planeta sendo considerado como o maior gerador de resíduos finais entre os macro-setores da economia (SJÖSTRÖM, 1996).

A Resolução 307/02 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2002) dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil, estabelecendo diretrizes, critérios, procedimentos e disciplinando as ações necessárias para minimizar os impactos ambientais causados pelas obras. Entre outras diretrizes a citada resolução aborda o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, incorporando o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e o Projeto de gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, sendo considerada na atualidade um avanço que pode proporcionar mudanças relevantes com relação ao uso de materiais de construção em obras, contribuindo para a redução de perdas e estímulo ao reaproveitamento e reciclagem dos resíduos.

O gesso recebeu do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) a denominação de resíduo de Classe C – resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis, que permitam a sua reciclagem/recuperação. Dessa forma, o incentivo atual à utilização do gesso na construção civil ficou bastante restritivo, gerando obrigações para os produtores que redundaram em queda de mercado para os pequenos produtores de gesso da região Nordeste.

Um dos maiores destaques da economia do Estado de Pernambuco é o Pólo Gesseiro do Araripe, no Sertão. Pernambuco é responsável pela produção de 95% do gesso fabricado no Brasil. Tem reservas de gipsita suficientes para o equivalente a 500 anos de exploração. O

Pólo Gesseiro do Araripe reúne 312 empresas (21 mineradoras, 61 calcinadoras e 230 fábricas de premoldados) que produzem e transformam 1,8 milhões de toneladas de gipsita por ano. Juntas, estas empresas são responsáveis pela geração de 12 mil empregos diretos e cerca de 60 mil empregos indiretos, movimentando milhões de reais (GOVERNO DE PERNAMBUCO, 2006).

Preocupados com o destino do gesso dentro da economia do Brasil e os impactos ambientais que são provocados pelo mesmo, vários pesquisadores vêm desenvolvendo trabalhos para definir técnicas de reaproveitamento ou reciclagem do gesso, tanto como resíduo da construção e demolição, como do próprio resíduo das fábricas de premoldados. Resultados bastante significativos em termos de reciclagem foram alcançados por Cavalcanti (2006), definindo condições operacionais de temperatura e pressão para produção de gesso beta reciclável. Este trabalho tem, portanto, como objetivo, a consolidar esse processo de produção de um gesso beta reciclável, determinando essas condições ótimas de temperatura e pressão.

Uma revisão literária sobre o assunto mostrou que a metodologia a ser empregada daria continuidade aos trabalhos iniciados por Cavalcanti (2006), calcinando a gipsita sob condições de temperatura e pressão controladas. Os resultados foram obtidos a partir de um planejamento fatorial e a análise dos dados com auxílio da técnica de análise das superfícies de respostas, geradas com auxílio de um modelo matemático quadrático. A região do ótimo foi identificada como a de pressão manométrica em torno de 0,6 atmosferas e uma temperatura em torno de 170 °C.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pólo Gesseiro do Araripe

O Brasil possui reservas abundantes de gipsita, estimadas em 1,2 milhões de toneladas, distribuídas principalmente nos estados da Bahia, Pará e Pernambuco.

A região do Araripe, sertão do estado de Pernambuco, possui abundantes reservas de gipsita as quais são consideradas como as de melhor qualidade no mundo, devido ao elevado teor de pureza do minério.

O pólo gesseiro de Pernambuco é formado por 47 minas, 61 unidades industriais de calcinação e 230 indústrias de pré-moldado, constituindo-se no principal centro produtor de gesso e gipsita bruta do país. Esta região dispõe de uma razoável rede de rodovias (a maioria pavimentada) e um elevado índice de eletrificação rural.

O chamado Pólo Gesseiro de Pernambuco é responsável pela produção de cerca de 1,45 milhões de toneladas de gipsita, representando 89% da produção brasileira (DNPM, 2003). Isto se deve às condições de aproveitamento econômico mais favorável das jazidas localizadas na região do Araripe. A região está localizada no epicentro do semi-árido brasileiro, no extremo oeste do estado, a cerca de 680 km da capital Recife, região nordeste do país.

Os principais fatores que contribuem pelo interesse no aproveitamento do minério do Araripe são: condições favoráveis de mineração (relação estéril/minério e geomorfologia da jazida); elevada pureza do minério (considerado o de melhor qualidade no mundo com teor médio de pureza em torno de 95%) e melhor localização, se comparado ao minério do estado do Pará.

O pólo gesseiro fica situado na fronteira dos estados de Pernambuco, Ceará e Piauí, ou seja, a um raio de cerca de 700 km encontram-se 8 capitais de estado (Salvador, Aracajú, Maceió, Recife, João Pessoa, Natal, Fortaleza e Teresina) e 8 importantes portos (Salvador, Aratú, Recife, Suape, Mucuripe, Pecém, Itaquí e Ponta da Madeira).

2.2 Obtenção do Gesso por Desidratação Térmica

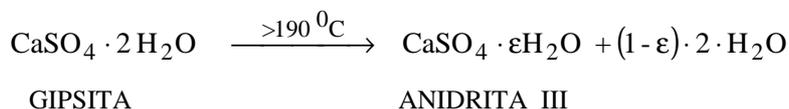
Quando se aquece a gipsita, de 20 °C a 1400 °C, tem-se a oportunidade de definir cinco fases do sulfato de cálcio. Na temperatura ambiente o mineral é essencialmente sulfato de cálcio dihidratado. Ao se alcançar 60 °C, conforme as condições experimentais de desidratação, inicia-se a perda pela gipsita de μ moléculas de água, onde μ pode variar de 0 a 2. É possível, entretanto, admitir a existência de mais de um tipo de semi-hidrato, dependendo da temperatura e pressão do processo, com teor de água que varia entre 0,15 e 0,66 moléculas de água, sendo o hidrato com meia molécula de água (ver estequiometria abaixo) uma forma particular intermediária, de grande interesse comercial pela sua estabilidade química. O grau de hidratação e cristalinidade do produto está associado ao processo de obtenção e condições de tratamento térmico.



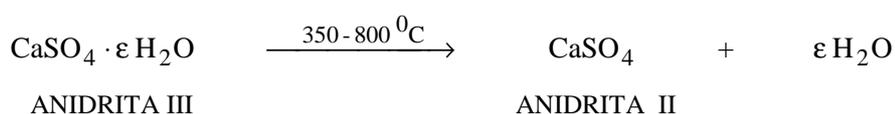
Duas formas de semi-hidrato de cálcio podem ser produzidas na desidratação térmica da gipsita, mas cada uma tem suas características próprias: a forma alfa (α) obtida pela desidratação da gipsita em uma suspensão aquosa ácida ou hidrotermicamente na presença de eletrólitos (FOLNNER, 2002), e a forma beta (β) produzida pela desidratação da gipsita em atmosfera de vapor d'água e acima de 100 °C. Normalmente, por motivos econômicos, o gesso beta é produzido a pressões muito próximas da atmosférica, mas isso leva a uma má formação dos cristais em função de uma saída abrupta da água de cristalização, provocando esfacelamento dos mesmos. Quando a mesma razão água/gesso é utilizada, o semi-hidrato alfa produzido apresenta-se com propriedades mecânicas bem melhores. Em processos industriais a velocidade requerida de produção de gesso beta é conseguida trabalhando-se em uma faixa de temperatura entre 140°C e 160 °C.

Quando a temperatura de 200 °C é alcançada, o semi-hidrato perde quase toda sua água e obtém-se uma anidrita solúvel (instável), denominada anidrita III. A anidrita solúvel, de fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot \epsilon \text{H}_2\text{O}$, indica que este produto pode conter água de cristalização, embora em baixo teor (ANGELERI; CARDOSO; SANTOS, 1983), variável entre 0,11 a 0,06 moléculas de água. Este tipo de anidrita confere ao gesso final 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 semi-hidrato com a umidade

do ar. Esta hidratação tem sido verificada após 12 horas de armazenamento do produto em atmosferas com umidade relativa de 80%. Industrialmente esta rehidratação ocorre após o gesso sair do forno em uma etapa conhecida como estabilização do gesso.



Ao se alcançar cerca de 400 °C, a anidrita III transforma-se em anidrita II, esta última de hidratação lenta e, como o processo de transformação da fase III para a fase II é exotérmico, a transformação é muito rápida e não-reversível:



Quando a temperatura de reação aumenta acima de 400 °C, a velocidade de rehidratação do produto obtido é cada vez mais lenta. A 500 °C necessita-se de mais de quatro dias, em média, para rehidratar metade da anidrita. A 600 °C, necessita-se de mais de 10 dias para rehidratar metade da anidrita e, a 800 °C, o produto é considerado de difícil rehidratação.

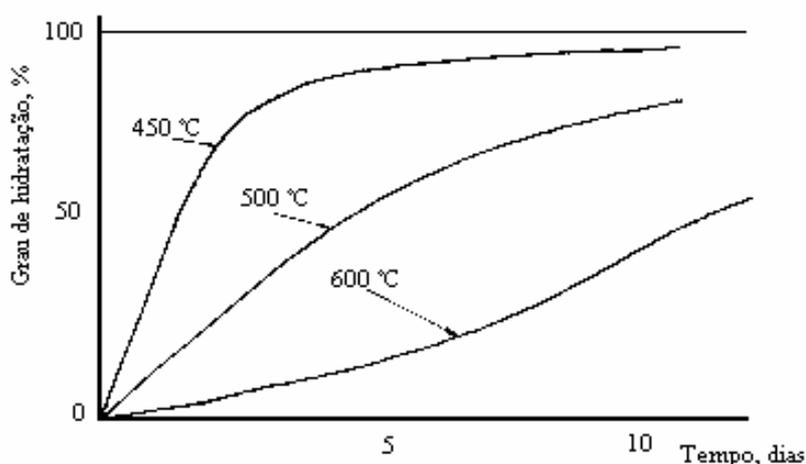


Figura 1 – Grau de hidratação em função do tempo para um gesso anidro

A anidrita II também chamada de anidrita artificial solúvel, ou ainda anidrita supercalcinada, de fórmula CaSO_4 , pode ser obtida entre 350 e 800 °C. Entre 700 - 800 °C é denominada de gesso calcinado à morte. Sua produção controlada entre 400 e 500 °C produz

uma anidrita utilizada como um dos constituintes dos gessos de construção, principalmente o gesso para revestimento de parede, por conferir resistências especiais à erosão e à compressão para a mistura final.

Quando se calcina a gipsita pouco acima de 800 °C, o produto é similar à anidrita natural encontrada na gipsita e conhecida como anidrita I, de hidratação extremamente difícil. Quando se atinge temperaturas de calcinação acima de 1250 °C, a gipsita decompõe-se em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.

Se a pressão parcial de vapor d'água no reator (por exemplo a 120 °C) for ainda maior que a de obtenção de vapor saturado, pode-se evitar o aparecimento de anidrita III. Mas se a gipsita for calcinada a baixas pressões de vapor d'água, obtém-se um produto instável, de difícil armazenamento por mais que alguns poucos dias, mas com um pequeno tempo de pega. Portanto, em se desejando um gesso que necessita ser armazenado, em silo ou em sacos por um longo tempo, ou obter um produto com longo tempo de pega, recomenda-se efetuar o processo de desidratação sob pressão de vapor d'água relativamente alta.

Para se entender as vantagens e desvantagens de cada processo para os diferentes e usuais empregos do gesso, é também necessário entender como as trocas de calor e água entre gás e minério de gipsita são realizadas durante o processo de calcinação. Enquanto o calor penetra na gipsita, a água move-se para fora da molécula.

A água é evacuada de acordo com a velocidade de difusão e distância da superfície. A velocidade de retirada da água é inversamente proporcional à dimensão da partícula ($1/d_p$). A velocidade de evaporação da água na superfície é função da superfície da partícula (d_p^2) e o volume de água a ser removido é função do volume da partícula (d_p^3). Se o diâmetro da partícula é duplicado, o tempo de calcinação necessário para atingir a mesma conversão fica multiplicado por quatro. Por exemplo, se forem necessários 6 segundos para calcinar uma partícula de 1 mm em uma corrente gasosa a uma dada temperatura, serão necessários 24 segundos para uma partícula de 2 mm de diâmetro (Figura 2). Um equipamento quatro vezes maior será necessário para a mesma produção.

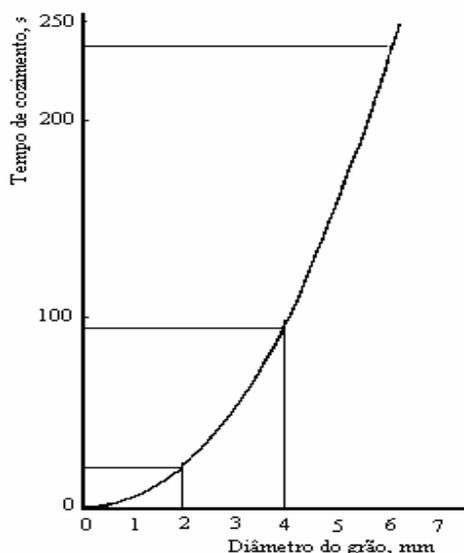


Figura 2 - Tempo de desidratação em função do diâmetro do grão de gipsita

A Figura 3 ilustra a forma de produto obtido quando se calcina uma dada quantidade de gipsita, onde o regime químico não é a etapa predominante. No final do processo pode-se ter quatro tipos de sulfato de cálcio. No centro da partícula sólida encontra-se gipsita não calcinada. Quando se movimenta em direção à superfície da partícula encontra-se primeiro uma camada de semi-hidrato, mais externamente uma camada de anidrita III e na superfície uma camada de anidrita I. Isto significa que ao se desejar conseguir um produto apenas, deve-se ajustar o tamanho da partícula e a temperatura do gás ou a superfície de transferência do calor necessário.

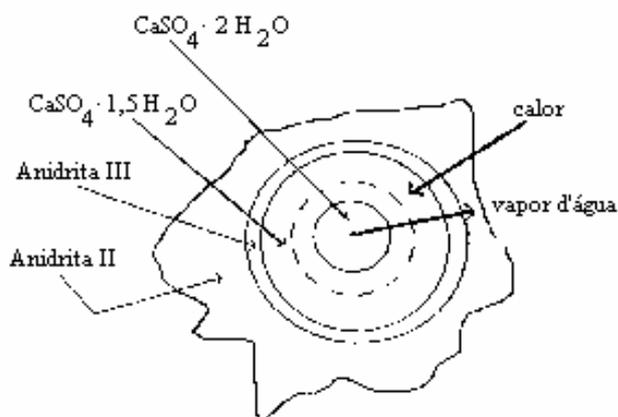


Figura 3 - Esquema da composição de um grão de gipsita calcinado

Ao se considerar que para ir de uma fase à outra precisa-se de energia, ou seja, para ir de gipsita a semi-hidrato, de semi-hidrato à anidrita III e de anidrita III à anidrita II, necessita-se do tempo necessário para conseguir a referida energia. Um esquema destas etapas pode ser visto na Figura 4.

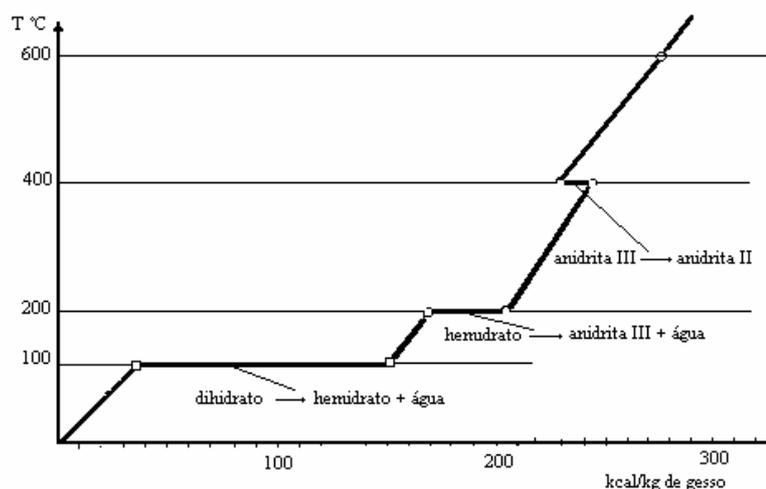


Figura 4 - Temperatura e energia de desidratação da gipsita

A desidratação térmica da gipsita para produção de gesso beta pode ser realizada com auxílio de aquecimento direto ou indireto. Por sua vez cada um destes processos pode funcionar em regime batelada ou contínuo (DALIGAND, 1985). A seguir, apresenta-se uma revisão dos principais processos praticados em diferentes regiões gesseiras do mundo, acompanhada de rápidos comentários sobre evoluções que o processo vem sofrendo (MOISET, 1997). Deve-se salientar de que a escolha de um ou outro tipo de processo produtivo tem sido movida pelo local de instalação da planta, existência de equipamento e qualidade do gesso solicitado pelo mercado.

2.3 Microestrutura do Gesso

A forma e o tamanho dos cristais que compõem um gesso endurecido dependem de alguns parâmetros inerentes aos próprios cristais do gesso não hidratado (CASPAR et al., 1996). Após mistura com água o gesso combina-se com a mesma para voltar ao dihidrato original através de uma reação de hidratação rápida, acompanhada de forte elevação de temperatura e de ligeiro aumento de volume (gonflement) dando lugar a um fenômeno conhecido como “pega”:

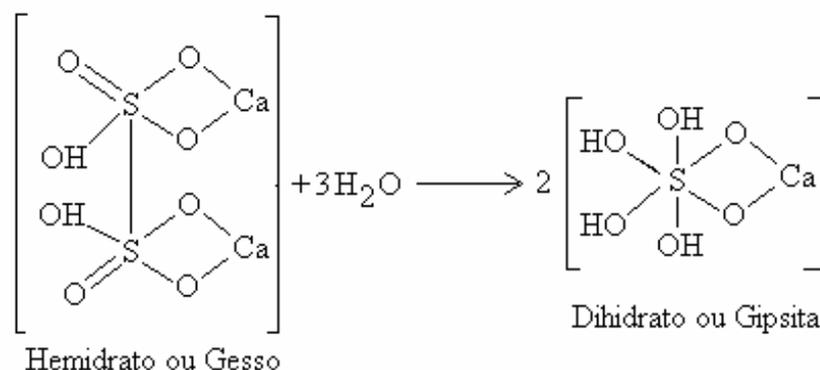


Figura 5 – Etapas de hidratação do gesso

O mecanismo de pega pode ser explicado da seguinte maneira: após seu contato com a água, uma parte do semi-hidrato contido no gesso dissolve-se rapidamente. Sua combinação com uma e meia moléculas de água, para formar dihidrato, o qual é cerca de cinco vezes menos solúvel que o semi-hidrato, resulta em uma solução supersaturada. A cristalização do dihidrato é muito rápida. A mistura adquire uma consistência pastosa que permite sua trabalhabilidade por alguns minutos. Desta forma, parte do semi-hidrato cristalizado libera uma certa quantidade de água que age sobre a outra parte ainda não cristalizada e assim por diante. A consistência da pasta aumenta pouco a pouco e quando a cristalização finaliza o gesso é “preso“. A dissolução do semi-hidrato de sulfato de cálcio pode ser considerada como um fenômeno de dissolução de um corpo em água com a penetração das moléculas desse corpo entre as moléculas da água. As moléculas da água, por sua vez, defendem-se contra essa penetração, a qual é proporcional à tensão superficial da água. Partindo-se então deste princípio, deve-se entender que todo aumento da tensão superficial da água diminui a velocidade de dissolução do gesso e, portanto, provoca um retardamento da pega. Ao contrário, toda redução da tenção superficial provoca a aceleração da dissolução e, conseqüentemente, a aceleração da pega (MURAT; JEANDOT, 1973).

A hidratação do semi-hidrato permanecerá constante na solução até que haja gesso ainda não dissolvido no sistema. No momento em que não reste mais gesso para dissolver é que a velocidade de hidratação poderá ser avaliada. Pode-se então estimar a referida velocidade média dentro de um intervalo de tempo infinitamente pequeno. A partir deste momento a concentração de semi-hidrato na solução vai diminuindo porque haverá hidratação do mesmo, não havendo mais semi-hidrato para ser dissolvido. A baixa solubilidade do

dihidrato em água provoca sua precipitação ao estado de cristais. Como toda cristalização pode ser inicializada pela presença de cristais na solução, no caso do gesso são os cristais de dihidrato que aceleram esse processo.

A resistência dos premoldados e produtos a base de gesso consiste da manutenção de integridade das mesmas quando submetidos a esforços, sejam eles de tração, compressão, cisalhamento ou até mesmo impacto e desgaste. Essas propriedades foram relacionadas com o crescimento cristalino por Hincapié e Cincotto (1997). Os referidos autores concluíram que o crescimento cristalino do gesso pode ser crítico, ou seja, com poucos núcleos, resultando em cristais de tamanho grande ou, no caso de cristais formados a partir de numerosos núcleos, resultando assim pequenos cristais. As propriedades mecânicas são prejudicadas quando o arranjo cristalino é formado por cristais mais finos. As propriedades mecânicas são, também, diretamente proporcionais a relação água/gesso, na medida em que aumenta a porosidade dos produtos confeccionados com gesso. Assim sendo, a determinação dos traços adequados e misturas de gesso são de extrema importância e necessária para a obtenção de um produto final com bom desempenho mecânico.

2.4 Fornos de Desidratação

O fogão de gesso é o mais antigo processo que se conhece com uma grande semelhança para o processo de produção de carvão (Figura 6). Amontoa-se uma certa quantidade de pedaços de gipsita (5 a 10 cm) misturados com uma alta quantidade de carvão vegetal. Cobre-se a pilha com terra e vidro de modo a deixar entrada e saída de ar, pondo-se fogo no carvão. O carvão queima por vários dias e o calor desidrata o minério de gipsita. Quando o fogão esfria, retira-se a cobertura de terra e vidro para coletar o gesso produzido. Pode-se ter simultaneamente: gipsita, semi-hidrato, anidrita III e anidrita II. O produto obtido dá um bom revestimento de parede. A gipsita não calcinada é um acelerador, o semi-hidrato beta é responsável pela firmeza e a anidrita II hidratará vagarosamente e regulará o aparecimento de bolhas de ar durante o período de secagem. A anidrita III hidrata-se muito rapidamente e é uma espécie de regulador da plasticidade da pasta. Porém, é necessário muito jeito para regular a quantidade de carvão no fogão e a alta temperatura dentro do mesmo durante o período de calcinação. Outro problema é a dificuldade em remover a terra e o carvão não queimado da mistura de componentes do produto obtido.

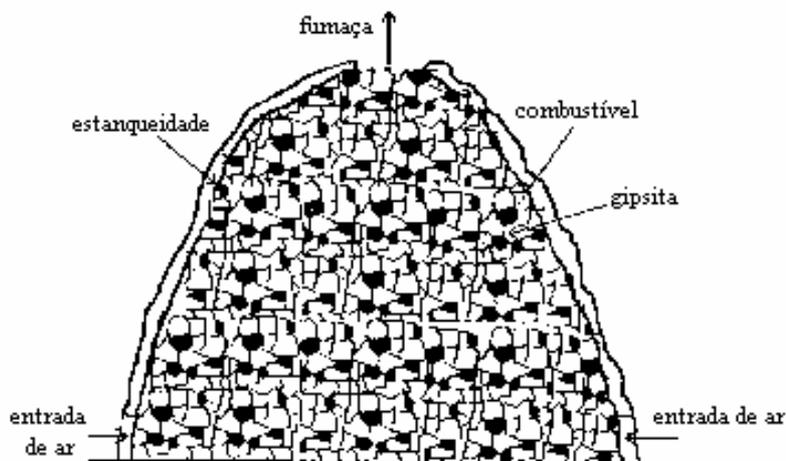


Figura 6 – Forno tipo fogão de gesso (MOISET, 1997)

O forno vertical (Figura 7), possui uma estrutura elaborada para evitar problemas semelhantes aos do fogão de gesso. O minério de gipsita é alimentado pelo topo da estrutura, enquanto que o aquecimento é feito pela base do forno, com o leito de minério separado da fonte de aquecimento por uma grelha. O gesso calcinado é extraído pela base, acima da grade. Inicialmente esta operação era realizada de forma manual e posteriormente com uma espécie de gaveta. Forno deste tipo esteve em operação no sul da França em 1983.

No processo utilizando o forno vertical o consumo de energia não é muito baixo, embora o regime de troca de calor seja o contracorrente. É possível, no entanto melhorar o consumo de energia através de um planejamento para a velocidade de retirada do material calcinado, uma vez que é difícil melhorar o fluxo de gás quente através do leito. Assim, em lugar de se obter partes mais calcinadas que outras, pode ser amenizar as perdas fazendo-se um estudo da distribuição de tamanhos para o minério.

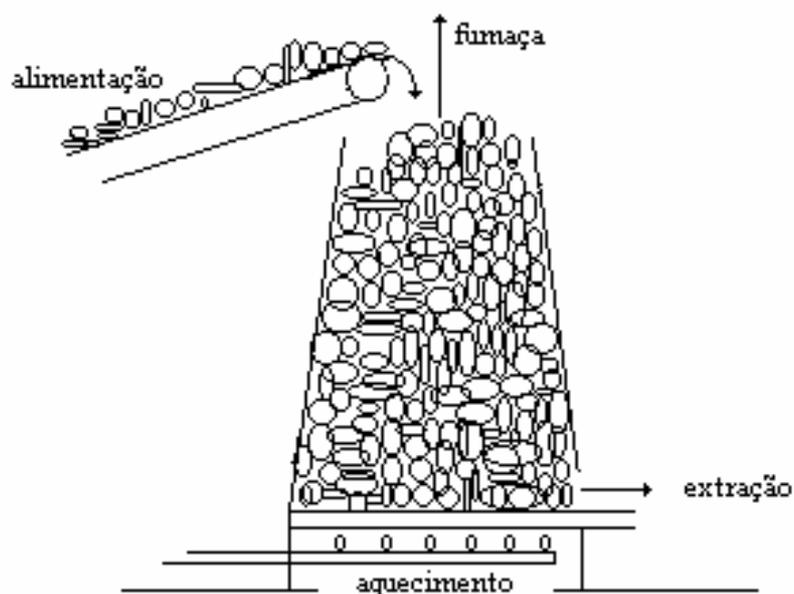


Figura 7 - Forno vertical (MOISET, 1997)

Como a produção em fornos verticais utilizando a estrutura mencionada anteriormente era baixa, as dimensões do minério foram sendo reduzidas, inclusive para evitar a formação de anidrita II.

Até aqui, o estudo das estruturas desenvolvidas permitiu a observação de quatro importantes considerações:

- a estrutura utilizada (forno vertical) é boa;
- outra opção para esta linha de processo é utilizar o minério de gipsita britado, calciná-lo com troca de calor indireta e moer o produto final para garantir uma granulometria desejada;
- o terceiro é calcinar o minério já com granulometria desejada no produto final por meio de troca de calor indireta e;
- o último é moer finamente o minério e calciná-lo suspenso em um fluxo de ar quente e em concorrente.

O forno vertical tipo “Alphaplatre” trabalha com minério britado com dimensões de 0 - 5 mm. O queimador fica dentro do forno, na sua região central, transferindo calor para o minério de gipsita através de suas extremidades (Figura 8). O tempo de residência da gipsita fica em torno de 45 minutos.

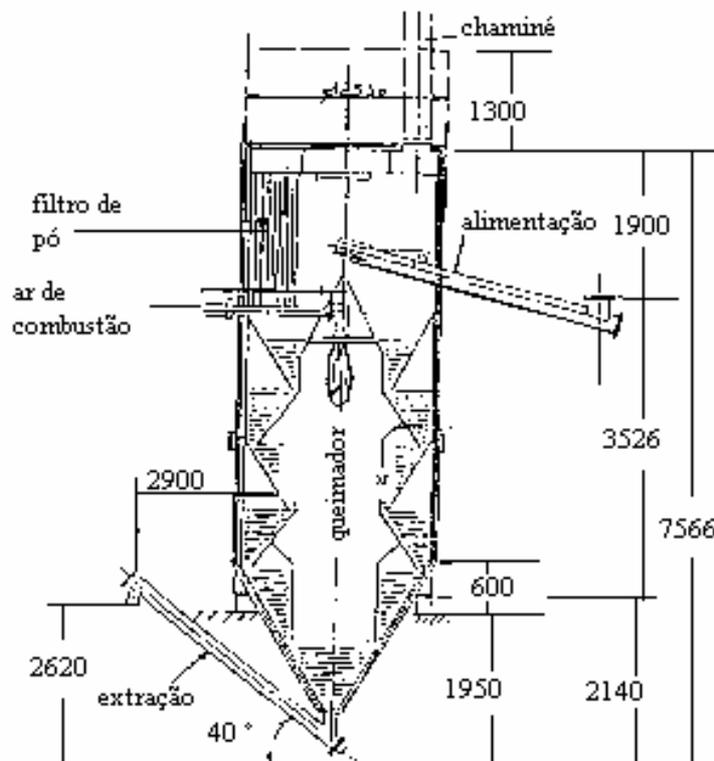


Figura 8 - Forno vertical tipo “Alphaplatre” (MOISET, 1997)

Este tipo de processo tem consumo médio de combustível de 26 kg de óleo combustível por tonelada de gesso. Como a temperatura do gás na saída do forno é muito baixa, existe um risco de condensação de água no filtro de manga. O produto final contém anidrita porque o produto calcinado na base do forno está em contato com gases muito quentes e secos.

Em forno rotativo para gesso supercalcinado (Figura 9) utiliza-se um fluxo de gás quente em contracorrente à gipsita. Isto dá possibilidades de se conseguir um gás muito frio no filtro de pó e ajustar a temperatura de supercalcinação pelo ajuste do fluxo de gipsita e da temperatura do gás de entrada do forno. O consumo de combustível é alto: 40 kg de óleo combustível por tonelada de gesso supercalcinado a 400 °C, 49 kg a 600°C e 58 kg a 800°C.

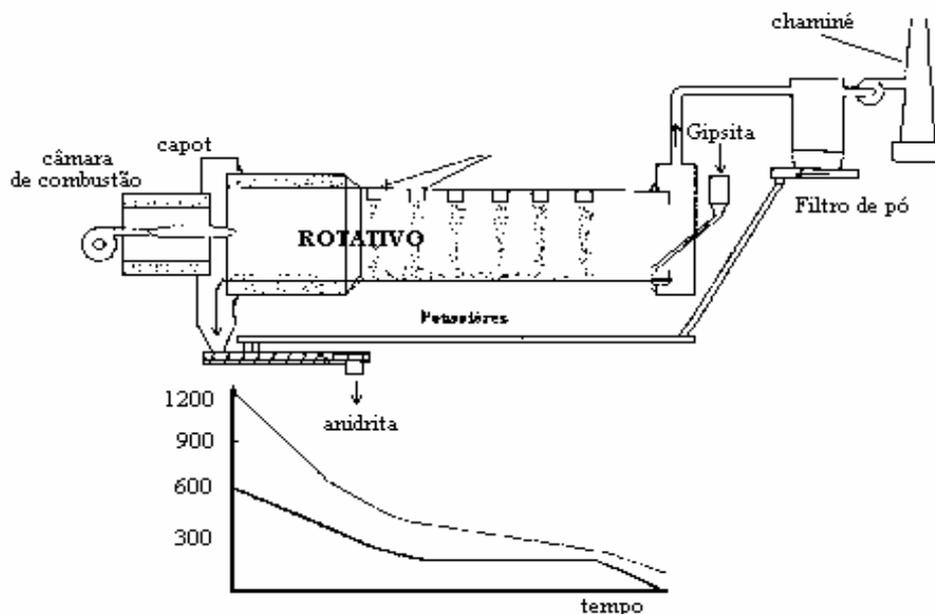


Figura 9 - Forno rotativo para produção de anidrita (MOISET, 1997)

Outro problema que surge neste tipo de forno é a grande quantidade de gesso perdido por arraste pelos gases de combustão. Este tipo de gesso arrastado é constituído de todos os tipos de produtos. Não pode ser recirculado porque voltará a ser arrastado. A única maneira de tratar este tipo de material de arraste parece que é misturá-lo com gesso supercalcinado a baixa temperatura quando se produz um gesso a 600 ou 800 °C. Recomenda-se por isso não utilizar gipsita com muitos finos.

Com o objetivo de controlar a temperatura de calcinação em torno de 160 °C na saída do forno para evitar a produção de anidrita II na superfície da gipsita britada, deve-se:

- operar o forno em regime concorrente (Figura 10);
- ter uma grande proteção contra os efeitos da radiação da chama na superfície da gipsita;
- ter uma temperatura do gás na saída do gerador de gás não muito alta.

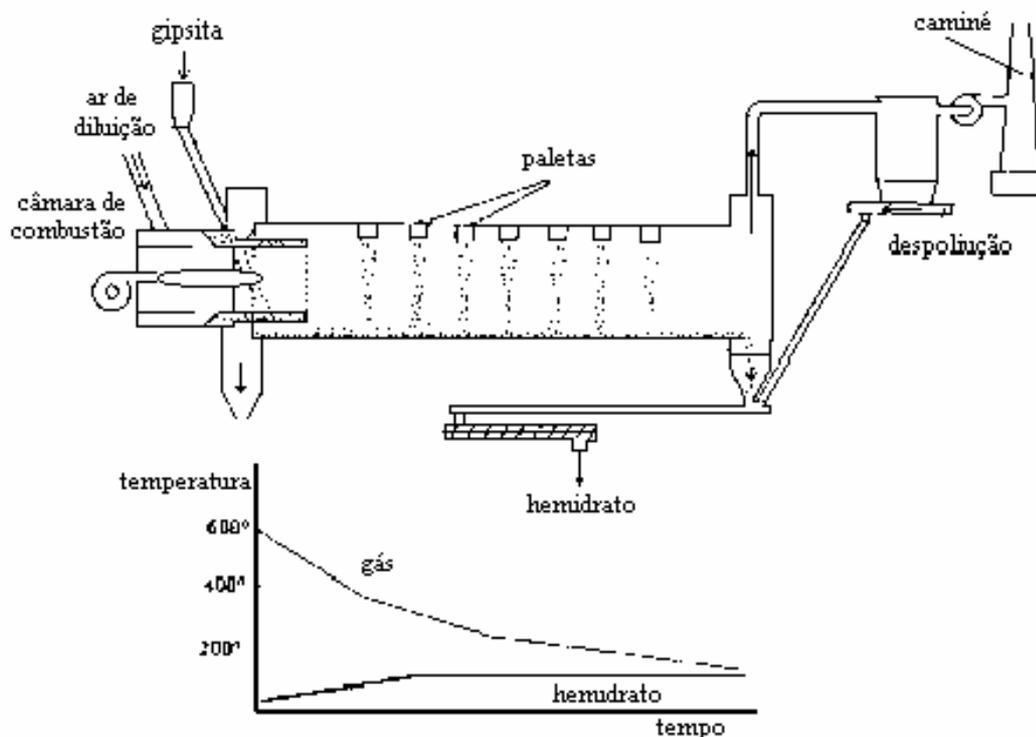


Figura 10 - Forno rotativo de fluxo concorrente (MOISET, 1997)

Com este processo ter-se-á problemas de reintrodução de finos, os quais podem conter alguma gipsita não calcinada. Deve-se então utilizar um processo similar ao usado para produzir gesso supercalcinado e misturar o produto final com os finos de modo a evitar a recirculação do pó e calcinar a pouca quantidade de gipsita deste pó.

O consumo de combustível é pouco acima de 30 kg de óleo combustível por tonelada de semi-hidrato. Uma das razões para este fato é a grande quantidade de anidrita III e alguma quantidade de anidrita II produzidas, requerendo para isto a evaporação de duas moléculas de água em lugar de uma e meia. Quando se está moendo gesso com uma boa ventilação de ar úmido, reverte-se muita desta anidrita III em semi-hidrato, fato que tem sido ignorado por muitos anos. Para diminuir o consumo de combustível alguns fabricantes deste equipamento propõem um forno rotativo com um tubo concêntrico para pré-aquecer a gipsita britada com os gases de exaustão e resfriar o produto da calcinação.

Em um forno rotativo de calor concêntrico a gipsita é introduzida entre o forno e um tubo interno concêntrico (Figura 11). A gipsita recebe calor do forno e da camisa usada para aproveitar os gases de exaustão com o produto calcinado, o qual é resfriado ao mesmo tempo.

Semelhante processo pré-aquece a gipsita e resfria o produto e os gases de exaustão, além de promover um menor consumo de combustível (pouco abaixo de 25 kg de óleo combustível por tonelada de gesso calcinado). Como a expansão dos tubos varia de um para outro, porque eles não estão a mesma temperatura, existe um risco de vazamento de ar e produtos. Isto requer que este tipo de forno seja construído por bons especialistas.

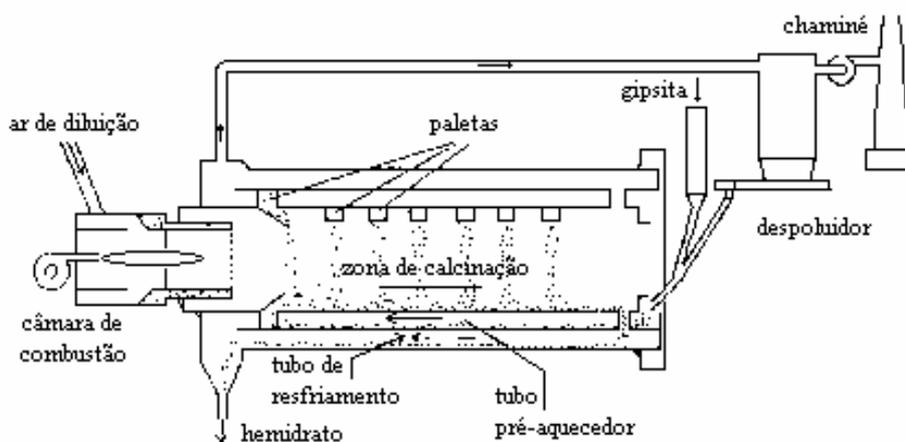


Figura 11 - Forno rotativo com trocador de calor concêntrico (MOISET, 1997)

Um forno do tipo Sola tem o aquecimento indireto e é utilizado para secagem e calcinação de minérios. A sola ou superfície inferior do recipiente que contém o minério, neste caso a gipsita, recebe aquecimento por contato com as chamas ou gases de combustão. O minério de gipsita moído (0 - 10 mm) é introduzido no topo do forno e submetido a agitação mecânica por ação de pás (Figura 12). Lentamente a temperatura de desidratação vai aumentando e o vapor d'água produzido vai sendo retirado. Neste tipo de forno pode-se produzir anidrita III com alta pressão parcial de vapor d'água. O produto obtido é do tipo semi-hidrato beta com grande tempo de pega e baixa água de empastamento. O processo é muito lento, a velocidade de produção é baixa e o consumo de combustível é relativamente alto. Contudo, ainda encontra-se muitos destes fornos em operação na Itália.

Por causa da qualidade do semi-hidrato beta produzido este processo deu início aos diferentes e familiares fornos marmittas vertical e horizontal.

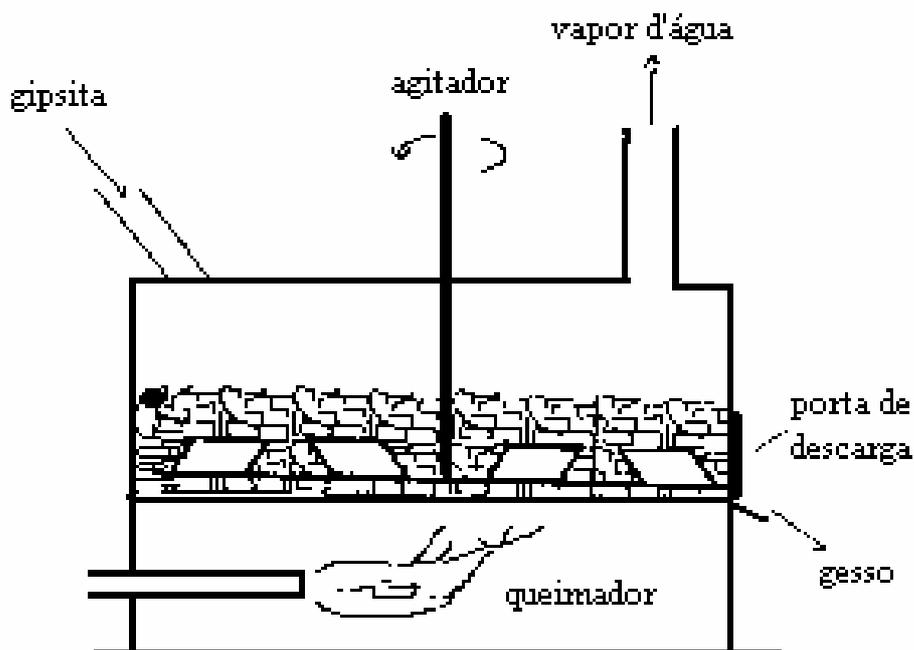


Figura 12 - Forno do tipo sola (MOISET, 1997)

O forno de marmitta vertical foi desenvolvido rapidamente com a fabricação de gesso em placas. Para obtenção de uma boa produção, o minério de gipsita deve entrar para o processo na granulometria do produto final (0 a 800 μm). Em regime batelada é apto a produzir de 6 a 9 toneladas por hora. A marmitta (Figura 13) é preenchida com a gipsita e é calcinada lentamente. Durante a calcinação toda a massa é agitada com auxílio de pás mecânicas e se comporta como um líquido devido a ação do vapor liberado pelo minério, o qual fluidiza os sólidos. O gesso produzido é menos denso e vai para o topo da marmitta. O calor é introduzido com auxílio de gases de combustão pela base da marmitta. Entretanto em alguma estruturas industriais são utilizados tubos transversais ao leito para circulação dos gases quente e/ou o contato dos referidos gases com as paredes laterais da marmitta, aumentando a superfície de aquecimento. O consumo de combustível fica em torno de 30 kg de óleo por tonelada de gesso produzido.

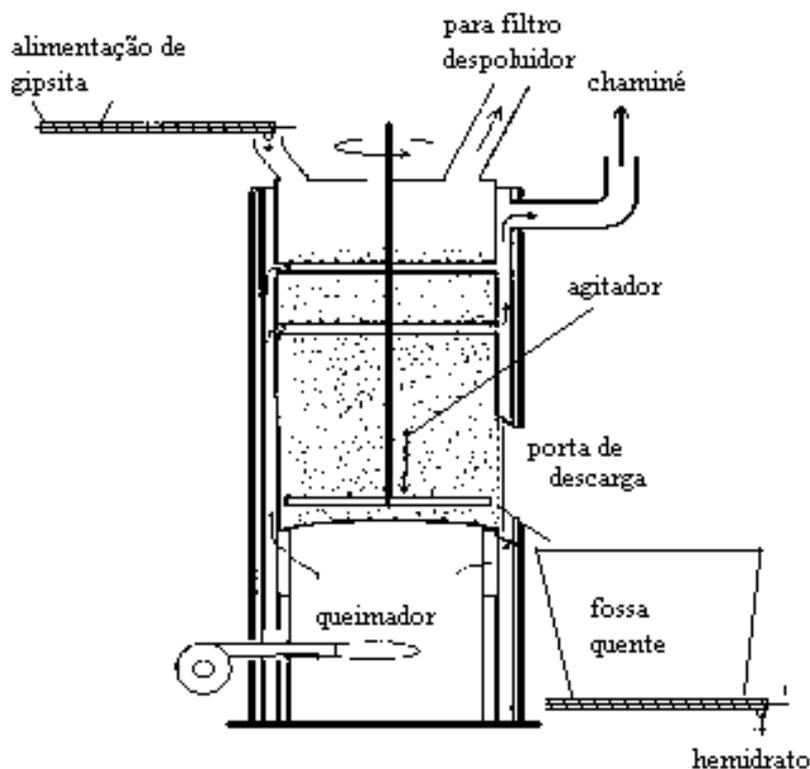


Figura 13 - Forno marmitta vertical (MOISET, 1997)

Durante o processo de calcinação em forno marmitta vertical a temperatura é mantida constante, em torno de 160 °C e a uma atmosfera de vapor d'água de 100 %. Quando a temperatura aumenta é sinal de que a desidratação foi completada. Segundo alguns estudiosos o semi-hidrato obtido é do tipo beta com 1,0 a 2,5 % de semi-hidrato alfa. Um dos pontos fracos deste processo é a tendência para operação em regime batelada. No final de cada batelada a temperatura de base da marmitta cai rapidamente com a introdução do minério frio para início de nova batelada. Esta queda brusca de temperatura enfraquece a chapa da base da marmitta, exigindo uma troca da mesma a cada 2 ou 3 anos, em média. Outro problema é o arraste de gipsita com o produto final durante a descarga. Como a gipsita é um acelerador do tempo de pega, o resultado são produtos finais com diferentes tempos de pega. Uma forma encontrada para amenizar estes efeitos é trabalhar em regime contínuo e extrair o produto final pelo topo da marmitta (overflow).

A Mister BEAU patenteou um forno do tipo marmitta horizontal (BEAU) em 1923, para calcinar gipsita com granulometria de 0 - 6 mm, com troca indireta de calor. Hoje

existem mais de 100 unidades industriais deste tipo operando em todo mundo; sendo construídos principalmente pela GRELBIN (GLELBEX). É um processo batelada apto a produzir até 10 toneladas por hora. A gipsita é introduzida na marmita rotativa e mantida em torno de 160 °C. Quando a temperatura começa a aumentar, o gesso produzido deve ser descarregado. O descarregamento é obtido com auxílio de uma rotação reversa do forno. De modo a evitar um abaixamento muito brusco de temperatura deve-se deixar cerca de 25 a 30 % do produto no interior do forno. A granulometria do produto final poderá ser atingida com auxílio de um simples moinho rotativo ou, se desejar um gesso mais fino um moinho mais sofisticado com separador de ar deverá ser utilizado para dar um produto de 0 - 100 µm.

Os gases de combustão quando saem do forno tipo marmita rotativo são ainda muito quente e, por isso este tipo de forno é geralmente equipado com trocador de calor para troca entre os gases de exaustão e o ar de combustão. Esse tipo de dispositivo pode reduzir o consumo de combustível, permitindo que o forno opere com um consumo em torno de 25 kg de óleo por tonelada de gesso produzido.

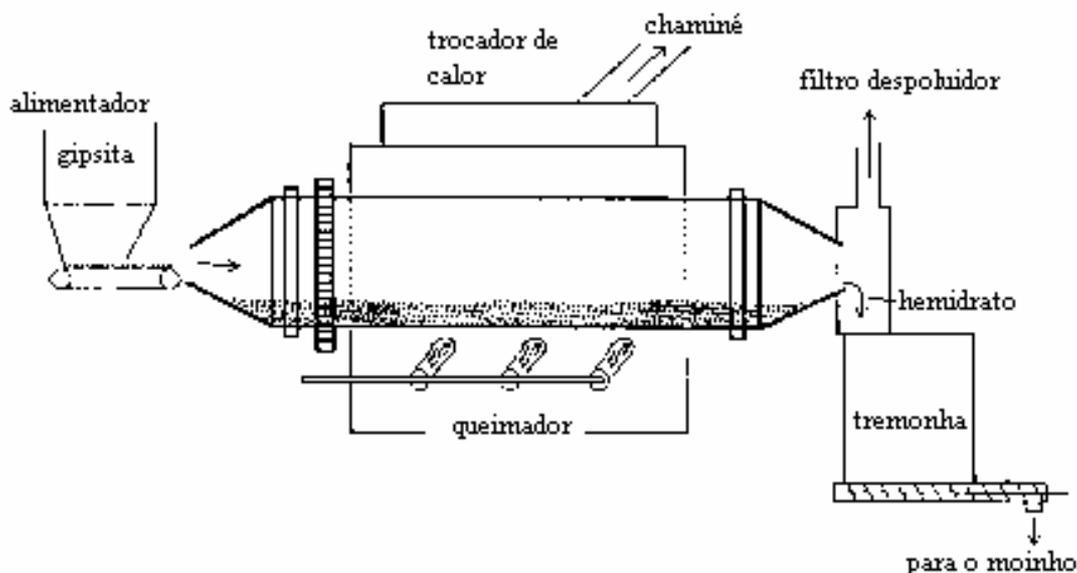


Figura 14 - Forno marmita horizontal ou forno “beau” (MOISET, 1997)

O forno do tipo calcinador rápido é utilizado para secagem por “flash” ou calcinação de minérios. Um típico exemplo de aplicação é o de produção de perlita expandida. A gipsita

é introduzida na base do desidratador e é carregado até o topo pelos gases quentes que ascendem neste setor, sendo posteriormente coletada por um filtro (Figura 15). A desidratação da gipsita a hemidrato ocorre durante o contato dos gases quentes com as partículas sólidas. A temperatura de entrada do gás quente fica entre 400 e 600 °C. Para partículas com diâmetro menor que 200 μm são requeridos tempos de calcinação da ordem de 3 segundos.

O problema com este tipo de reator tem sido a baixa estabilidade do fluxo de gás, principalmente quando o diâmetro do reator ultrapassa 1 m como forma de se obter colunas com alturas menores. No topo desta, as velocidades do gás próximas à parede é muito menor que a seção central da mesma. Assim as grandes partículas tendem a descender pela coluna se a velocidade do gás não é suficiente para carregá-las; o que significa uma necessidade de velocidades da ordem de 5 m/s e colunas longas (maiores que 10 m de altura). Por este motivo este tipo de equipamento tem sua produção limitada, limitando também seu emprego na produção de gesso calcinado.

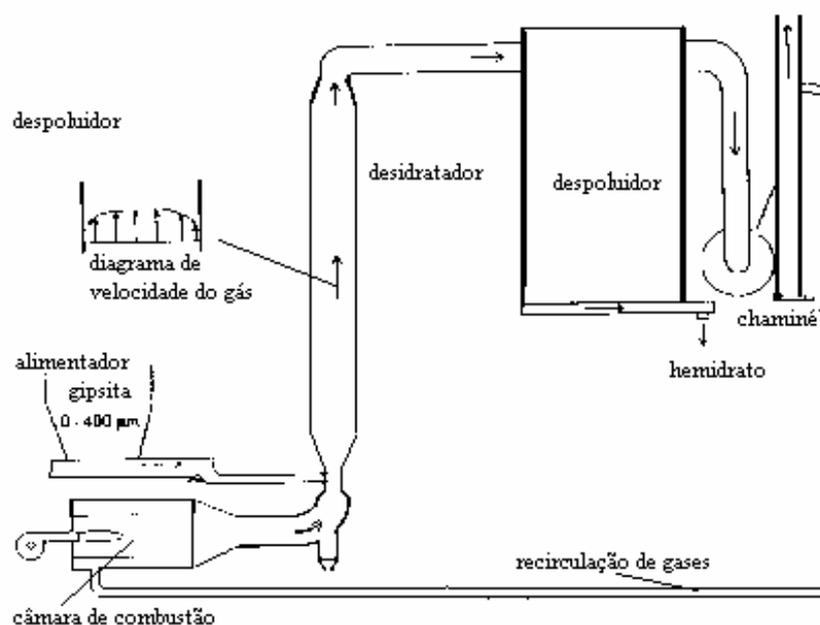


Figura 15 - Calcinador rápido (Flash) (MOISET, 1997)

A idéia básica do forno CLAUDIOS PETERS foi usar o equipamento para moagem e calcinação de gipsita e moagem e secagem de carvão usado em plantas para alimentação de

foros. Como precisa-se de mais energia para a calcinação da gipsita, neste caso trabalha-se com um gás a alta temperatura. Por este motivo deve-se evitar contato dos mancais com o gás quente. Em 1970, CLAUDIUS PETERS construiu um equipamento (Figura 16) no qual dois moedores em forma de rolos foram adaptados sobre um disco horizontal. A gipsita com granulometria entre 0 e 50 mm é alimentada no centro do disco, passando por baixo dos rolos e entrando em contato com os gases quentes. A gipsita moída sofre então arraste pelos gases e no percurso até o topo do moinho passa por um processo de desidratação. Neste ponto, um separador de sólidos retém as partículas maiores ou aglomerados de partículas, neste último caso com riscos de haver partículas não calcinadas, fazendo-as retornar à base do equipamento para sofrerem nova moagem; as partículas finas (0 a 600 μm) saem pelo topo e são coletadas por um filtro. O equipamento pode sofrer ajustes através da velocidade do gás, temperatura do gás, pressão dos rolos e altura do separador de sólido-gás. Pode-se também trabalhar com um gás mais úmido fazendo-se recircular parte do gás da chaminé.

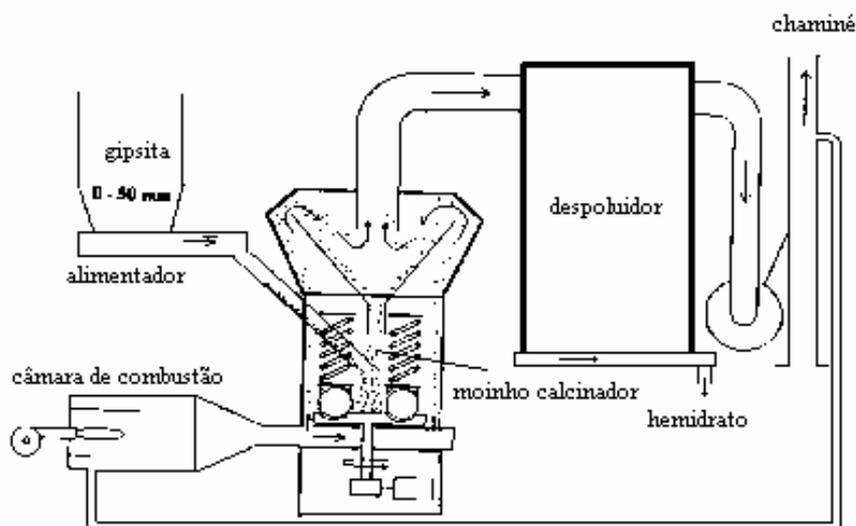


Figura 16 - Moinho calcinador CLAUDIUS PETERS (MOISET, 1997)

O ciclone desidratador GRELBEX tem como objetivo reduzir problemas com peças sobressalentes a GRELBEX elaborou este equipamento, uma vez que os ciclones são equipamentos bastante simples. O ciclone calcinador compõe-se basicamente de dois processos simultâneos um de calcinação e outro de separação, de modo que neste último possa-se ainda serem retidas e recirculadas partículas aglomeradas, devido ao risco de conterem material não calcinado (Figura 17). A zona de calcinação é projetada de modo a se ter, mais ou menos, o mesmo tempo de residência para todas as partículas. Pode-se ajustar a

distribuição de tamanho das partículas que saem do filtro, ajustando as condições de entrada de sólidos no topo do separador. A calcinação é realizada no interior do ciclone e no tubo que liga o ciclone ao filtro.

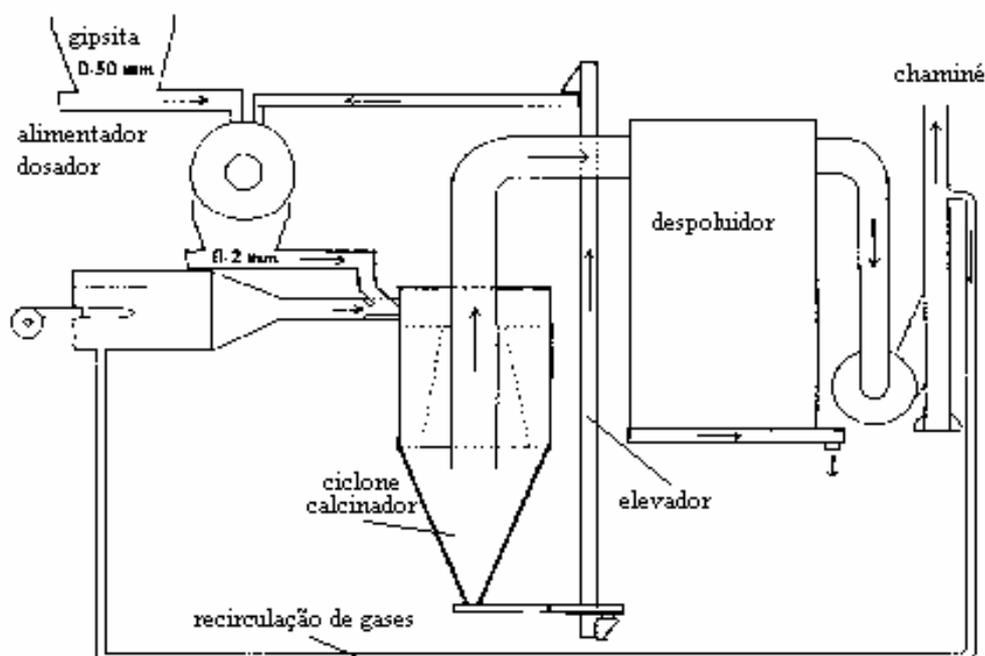


Figura 17 - Ciclone calcinador GRELBOX (MOISET, 1997)

Exceto os eixos de pequenos diâmetros para ajustes de chicanas e válvulas rotativas na entrada do separador e “flaps” de retenção de partículas muito aglomeradas, não se tem outros pontos de escapamento de gás. Não se tem praticamente parte móvel em contato com gases quentes. A britagem da gipsita é feita em uma planta separada com seleção por peneiras e recirculação das partículas maiores que 2 mm. Quando a região da base do ciclone é adequadamente ajustada, obtém-se um semi-hidrato beta próprio para a construção, com granulometria entre 0 e 800 μm devido a ajustes na pressão de vapor provocada pela recirculação de gases da chaminé.

Não se necessita de peças sobressalentes especiais e a manutenção de equipamento pode ser realizada com recursos locais. Pode-se iniciar e parar a operação da planta tanto quanto se desejar, ou tão rápido quanto a fonte de calor possa permitir a capacidade de produção de semelhante equipamento vai de 3 a 40 toneladas, porém para pequenas

produções não se pode reduzir muito o tamanho da zona de calcinação porque o tempo de residência das partículas é o mesmo para produzir 3 ou 40 toneladas por hora.

Com a finalidade de reduzir a produção de anidrita em fornos do tipo marmitta vem sendo difundido na transformação deste tipo de forno em fornos a leito fluidizado, os quais operam com a alimentação direta dos gases quentes através do leito de gipsita particulada. A adoção deste princípio aumenta tanto a eficiência térmica quanto a produção de uma marmitta convencional. Nos fornos a leito fluidizado um gás aquecido, geralmente o ar, é introduzido pela base do recipiente contendo gipsita particulada. O gás é distribuído homogeneamente através do leito a uma vazão capaz de manter as partículas sólidas em suspensão, favorecendo a troca de calor e a agitação em toda a extensão do leito.

Uma forma de facilitar a carga e descarga de material em fornos a leito fluidizado e, conseqüentemente, aumentar a produção é a utilização do leito fluidizado móvel (Figura 18). O recipiente contendo o leito é dividido em câmaras dispostas em série e interligadas por vertedouros. Um fluxo contínuo de gipsita particulada atravessa o recipiente de uma extremidade a outra do reator. O deslocamento contínuo dos sólidos é favorecido pelo fluxo de gás e disposição dos vertedouros. A temperatura em cada câmara é regulada para facilitar a obtenção de um perfil adequado de temperatura, o que na prática estabelece uma certa diferença crescente de temperatura no sentido alimentação-descarga do forno.

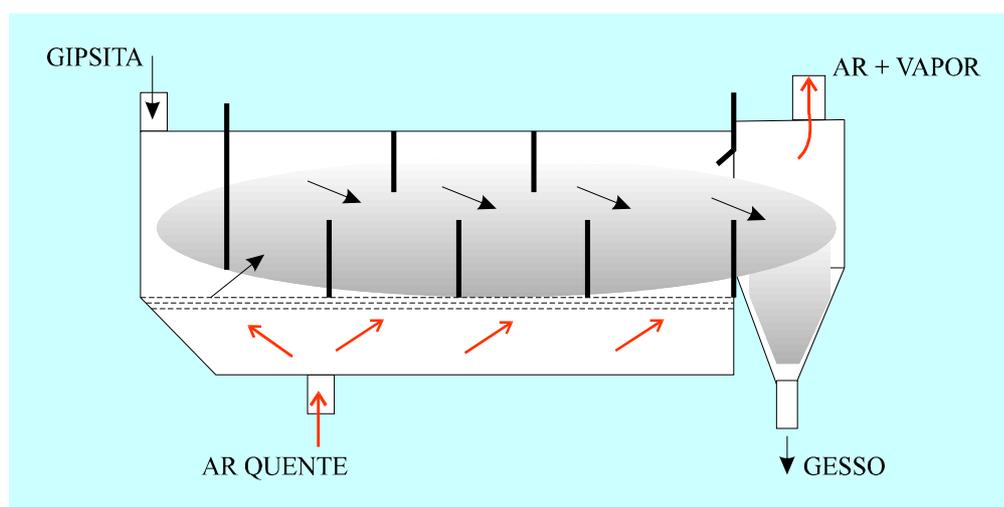


Figura 18 - Forno a leito fluidizado móvel (MOISET, 1997)

2.5 Fornos do Pólo Gesseiro do Araripe

Na região do Araripe são encontrados cerca de 400 fornos em atividade. Os tipos mais usados são os denominados: panela, marmita vertical, marmita horizontal e o rotativo de queima indireta (BASTOS; BALTAR, 2003).

Esses fornos proporcionam uma calcinação sob pressão atmosférica isto é, sem controles adequados de pressão e temperatura. A exceção de algumas poucas empresas do Pólo (Supergesso e Lafarge, por exemplo), as quais possuem fornos de fabricação européia, as demais possuem fornos de fabricação local.

As pequenas indústrias fabricam gesso com auxílio de fornos do tipo sola, utilizados em épocas passadas para a fabricação de farinha de mandioca (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2001). Além desse tipo de tecnologia “artesanal” a ausência de mecanismos de controle para temperatura e pressão contribui para a produção de um gesso frágil, sem possibilidades de reaproveitamento por red desidratação.

As empresas classificadas como de médio porte têm, em sua maioria, fornos do tipo rotativo contínuo ou batelada (Barriga Quente). Também neste caso não existe um controle rígido de temperatura e pressão, dificultando a obtenção de um gesso de qualidade sem possibilidade de serem reaproveitados por reciclagem.

Apenas duas fábricas de grande porte possuem fornos importados, com controles sofisticados e precisos para monitoração da qualidade do gesso. Uma delas utiliza o gesso produzido na fabricação de painéis de gesso acartonado, o que dificulta a reciclagem e o reaproveitamento desse material no futuro, devido à mistura íntima do gesso com contaminantes dos tipos papel e adesivo (CAVALCANTI, 2006). No outro caso, existe dificuldade de manter no mercado um gesso de melhor qualidade, uma vez que este requer um maior custo. Uma vez que o mercado ainda não é tão exigente, produzir gesso por processos sofisticados esbarra numa concorrência desleal, uma vez que a maioria dos produtores ainda trabalham em condições quase artesanais e o mercado ainda não impôs aos fabricantes do Pólo Gesseiro um selo de qualidade.

2.6 Propriedades e Aplicações do Gesso

O gesso é principalmente usado na produção de artefatos de placas para forro e chapas acartonadas, as quais têm vastas aplicações na indústria da construção.

O gesso empregado na construção civil é obtido a partir de um minério com grau de pureza superior a 75% (DOMINGUES; SANTOS, 2001). A calcinação produz um semi-hidrato β que, dependendo do processo, pode ser do tipo A (gesso de fundição) ou do tipo B (gesso de revestimento). A partir desses tipos de gesso são obtidos diferentes produtos:

- gesso de fundição utilizado para a confecção de pré-moldados (fabricados simplesmente com gesso ou como placas de gesso acartonado);
- placas para rebaixamento de tetos, com produção artesanal ou em plantas modernas com máquinas automáticas com sistemas de alimentação de pasta;
- blocos para paredes divisórias;
- gesso para isolamento térmico e acústico (produto misturado com vermiculita ou perlita);
- gesso para portas corta fogo;
- gesso de revestimento de aplicação manual, utilizado para paredes e tetos, geralmente em substituição de rebocos e/ou massas para acabamento;
- gesso de projeção, para aplicação mecanizada de revestimento de parede;
- gesso com pega retardada, para aplicação de revestimento manual e;
- gesso cola, para rejunte de pré-moldados em gesso.

Além da construção civil, o gesso é aplicado na medicina, indústrias farmacêuticas e de alimentos. Utiliza-se o gesso na cirurgia, traumatologia, odontologia, como desinfetante e é também matéria-prima de muitos medicamentos. Já na indústria alimentícia, o gesso é utilizado no acondicionamento de água para fabricação de cerveja e na limpeza de vinhos.

2.7 Reciclagem do Gesso

O desperdício estimado de gesso na Indústria da Construção Civil é de 45%. A redução deste desperdício deve fazer parte do dia a dia das empresas, pois o custo do material perdido, aliado ao da gestão dos resíduos, pode afetar a competitividade da solução. A solução está basicamente associada ao aumento do tempo útil das argamassas de gesso e ao uso de mão de obra qualificada (JOHN; CINCOTTO, 2003).

A presença de gesso em resíduos de concreto e de argamassa que serão aproveitados futuramente pode provocar efeito danoso aos mesmos (AGUIAR, 2004). O sulfato, presente no gesso, em compostos de alumínio e de cálcio como o C3A, por exemplo, podem levar a

formação de produtos expansivos e provocar fortes tensões internas e a fissuração desses materiais. A maioria das normas limita o teor de sulfatos nos agregados a um valor máximo de 1% (JOHN; CINCOTTO, 2003). Sendo assim, o resíduo a base de gesso deve ser separado e ter destinação própria.

Deve-se salientar ainda que a Resolução 307/02 do CONAMA e a NBR 10004/04 – Resíduos Sólidos – Classificação, considerou o gesso como resíduo não inerte e que, deste modo, não pode ser simplesmente depositado nos aterros de construção, contribuindo assim para a preocupação do meio técnico com este tipo de resíduo.

Em relação ao descarte das peças premoldadas e de gesso acartonado são seguramente mais fáceis de separar no processo de triagem de entulho para a produção de agregados reciclados, em função do seu tamanho e também por ficarem isoladas dos outros componentes construtivos (AGUIAR, 2004). No caso de revestimentos de gesso, a identificação do material e a tarefa de separar o gesso do substrato não são viáveis, pois o gesso apresenta elevada aderência a todos os tipos de base mineral.

Com isso percebe-se a necessidade de separação dos resíduos de demolição e reforma a base de gesso antes do seu reaproveitamento, tornando necessária a elaboração de um adequado e apropriado plano de gerenciamento e separação desses resíduos. A ausência de procedimentos adequados pode introduzir a presença de contaminantes no resíduo, fato que pode inviabilizar a sua reutilização.

O trabalho iniciado por Cavalcanti (2006) trouxe expectativa de solução para o problema da reciclagem dos resíduos de gesso na construção civil e na própria indústria de premoldados de gesso. Após intenso levantamento bibliográfico o referido pesquisador contribuiu com o desenvolvimento de uma técnica de obtenção de gesso reciclável. O referido autor determinou condições operacionais preliminares de temperatura e pressão, sob as quais ocorre desidratação térmica do minério de gipsita que dá origem a um tipo de gesso beta reciclável. Elaborou e confeccionou um reator batelada, tipo autoclave e em escala de laboratório, para produção de gesso beta a partir do minério de gipsita e sob pressão manométrica abaixo da pressão atmosférica. Esse excedente de pressão foi obtido restando-se parte do vapor produzido com a desidratação do minério, por meio de uma válvula do tipo alívio automático. A desidratação do minério de gipsita nessas condições deu origem a um gesso beta com características mecânicas superiores as do gesso convencionalmente produzido pela maioria dos processos produtivos existentes no Pólo Gesseiro do Araripe, Pernambuco.

Sob pressão controlada manométrica a 0,65 atmosferas e a aproximadamente 160 °C (CAVALCANTI, 2006).

Ainda no trabalho realizado por Cavalcanti foram testadas algumas importantes propriedades do gesso beta produzido sob a pressão manométrica acima da pressão atmosférica e comparadas com aquelas obtidas de um gesso produzido sob condições convencionais (pressão muito próxima da atmosférica). Os testes verificaram valores da água de hidratação para confirmar a obtenção da conversão da reação e de propriedades como massa unitária, módulo de ruptura à flexão, dureza e tempo de pega. Os gessos beta produzidos sob pressão foram testados em três ciclos de vida e em ambos apresentaram características de um gesso com cristais bem formados, homogeneamente dispostos e de baixas porosidades inter- e intracristalina. Sua comparação com gesso convencional através de suas propriedades mecânicas mostrou superioridade, principalmente com relação ao segundo ciclo de vida e posteriores. Neste caso, também obteve um índice de reciclagem de 100 %.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição Sucinta do Arranjo Experimental

Seguindo roteiro desenvolvido por Cavalcanti (2006), o minério de gipsita foi triturado com auxílio de moinhos de mandíbula e a disco para obtenção de uma granulometria da ordem de 35 mesh (35 divisões por polegada linear). Essa granulometria é adequada à sua calcinação pela garantia de ocorrência única da etapa química como controladora da reação de desidratação (SANTOS, 1996).

O minério de gipsita foi então distribuído em bandejas no interior de um forno do tipo autoclave, o qual possui controle interno de pressão (Figura 19). O forno foi confeccionado em chapa de cobre de três milímetros de espessura e tem formato cilíndrico. As extremidades do forno possuem tampa e base de formatos parabólicos. A solda entre o corpo e a base do forno é do tipo amarela para se trabalhar com temperaturas de até 500 °C. A pressão no interior do forno é mantida com a retenção de parte do vapor d'água produzido na própria reação de desidratação, com auxílio de uma válvula de alívio calibrada para descarga automática do vapor excedente. O aquecimento do forno é realizado colocando-se o mesmo no interior de uma estufa com controle digital de temperatura. Existe uma correlação direta entre a temperatura do forno e da estufa (CAVALCANTI, 2006), de modo a se poder controlar a temperatura do forno através do controle digital de temperatura da estufa (Figura 20).

O forno autoclave, batelada, é carregado com o minério de gipsita, hermeticamente fechado e mantido sob temperatura de reação, após iniciada a mesma por cerca de uma hora. Durante a operação a pressão no interior do forno é mantida constante, com auxílio da válvula de alívio, a qual libera o excedente de vapor produzido pela reação de desidratação do minério de gipsita. A temperatura da estufa mantém-se constante uma vez que a pressão no interior da mesa e externa ao forno é mantida como igual a da atmosfera ambiental do laboratório. Ao se desligar o forno, completo o tempo de reação, o restante do vapor é liberado para não haver absorção pelo gesso produzido. As bandejas contendo produto desidratado são imediatamente levadas a um dessecador atingirem a temperatura ambiente e serem pesadas até valor constante como indicação de equilíbrio entre o gesso produzido e as condições ambientais.

Após cada corrida com o forno batelada em escala de laboratório a conversão da reação na obtenção do gesso é determinada com auxílio da determinação do teor da água de

desidratação do material retirado do mesmo. Para isso utilizou-se uma balança térmica que usa a técnica de infravermelho. Testes de massa unitária, dureza e módulo de ruptura à flexão foram realizados para caracterização do gesso produzido em formatos adequados de corpos de prova. Todo o gesso produzido é estocado em sacos plásticos para posterior confecção de corpos de prova.



Figura 19 – Reator do tipo autoclave para produção de gesso beta reciclável em escala de bancada



Figura 20 - Estufa com controle digital de temperatura utilizada como fonte de calor para reação de desidratação térmica que ocorre no forno-autoclave

3.2 Planejamento dos Experimentos

O planejamento fatorial é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis independentes, de interesse, que apresentam influências significativas para a variável dependente, ou de resposta, são avaliadas ao mesmo tempo (Barros Neto; Scarminio; Bruns, 2002). Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores. De um modo geral, o planejamento fatorial pode ser representado por b^α , em que α é o número de variáveis e b é o número de níveis escolhidos. Por exemplo, em função deste número de fatores e de níveis, um planejamento fatorial pode ser indicado como sendo 2^3 , o que já sugere que o número de experimentos diferentes a serem realizados é 8.

Em geral os planejamentos fatoriais do tipo 2^α são os mais comuns. Um dos aspectos favoráveis deste tipo de planejamento é a realização de poucos experimentos. É óbvio que com um número reduzido de níveis não é possível explorar de maneira completa uma grande região no espaço das variáveis. Entretanto podemos observar tendências importantes para a realização de investigações posteriores. Podem-se ter planejamentos fatoriais em que seja interessante explorar uma ou mais variáveis com um número de níveis diferente das demais. Desta forma a representação do fatorial passa a ser, por exemplo, $b_1^\alpha \cdot b_2^\beta \cdot b_3^\gamma$, isto é, b_1 , b_2 e b_3 são níveis para as variáveis α , β e γ , respectivamente.

Muitas vezes em um sistema, diversos fatores podem influenciar a resposta desejada. Quando não se conhece bem o fenômeno, um experimento para triagem deve ser executado com o interesse em se determinar as variáveis experimentais e as interações entre variáveis que têm influência significativa sobre as diferentes respostas de interesse. Após selecionar as variáveis que são possíveis de serem estudadas e que provavelmente interferem no sistema, é preciso avaliar a metodologia experimental (tempo, custo, etc.). As variáveis que não foram selecionadas devem ser fixadas durante todo o experimento (TEÓFILO; FERREIRA, 2006). Em uma etapa seguinte, deve-se escolher qual planejamento usar para estimar a influência (o efeito) das diferentes variáveis no resultado. No estudo de triagem, as interações entre as variáveis (interações principais) e de segunda ordem, obtidas normalmente pelos planejamentos fatoriais completos ou fracionários, são de extrema importância para a compreensão do comportamento do sistema.

Após a realização dos experimentos de triagem, os fatores significativos são selecionados e uma metodologia de análise de superfícies de respostas (MYERS; MONTGOMERY, 2002) pode ser executada para otimização do experimento. Nesta situação, otimizar significa encontrar os valores das variáveis que irão produzir a melhor condição desejada, isto é, encontrar a região ótima na superfície definida pelos fatores. A metodologia de superfície de resposta baseia-se na construção de modelos matemáticos empíricos que geralmente empregam funções polinomiais, lineares ou quadráticas, para descrever o sistema estudado e, conseqüentemente, oferecer condições de explorar o sistema até sua otimização.

Um planejamento experimental elaborado para estimar coeficientes, segundo algum modelo matemático, deve reunir certos critérios desejáveis, sendo os principais (RODRIGUES; IEMMA, 2005): proporcionar boas estimativas para todos os coeficientes, exigindo poucos experimentos e, fornecer condições de avaliação dos coeficientes e do modelo, ou seja, da regressão e da falta de ajuste.

No caso da busca pela região ótima para a produção de gesso beta reciclável, a etapa preliminar de identificação das variáveis de interesse foi realizada no trabalho de Cavalcanti (2006). Dessa forma, as referidas variáveis foram a pressão manométrica de desidratação e a temperatura associada. Para obtenção de uma melhor definição para a região ótima, o planejamento envolveu três níveis (Tabela 3.2) e um ponto central (KALIL; MAUGERI; RODRIGUES, 2000), para que o ajuste recaísse através de um modelo matemático quadrático:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 \quad (3.2)$$

Como variáveis dependentes, para identificação da qualidade dos corpos de prova produzidos a partir do gesso obtido em condições controladas de temperatura e pressão, ficaram definidas as propriedades massa unitária, dureza e módulo de resistência à flexão (CAVALCANTI, 2006).

Tabela 3.2 – Valores associados aos níveis para o planejamento fatorial adotado

Variáveis Independentes	Níveis		
	-1	0	+1
Pressão, atm	0,1	0,5	0,9
Temperatura, °C	150	170	190

Com a definição do tipo de planejamento foram necessários 30 experimentos. Para cada valor médio da variável dependente foram realizadas duas replicatas, num total de três experimentos. Vinte e sete experimentos para três níveis com três repetições e, adicionalmente, três experimentos no ponto central, ou ainda um ponto central por bloco de 9 experimentos (3^2).

3.3 Microestrutura do Gesso Produzido

A presença de cristais mal formados de semi-hidrato dá origem a cristais de dihidrato defeituosos e as chamadas agulhas cristalinas soldadas, responsáveis pelas propriedades mecânicas do gesso reidratado. Cristais de semi-hidrato bem formados, devido às condições de temperatura e pressão sob controles garantirão a formação de cristais alongados o suficiente para geração de uma malha de entrelaçados, garantindo melhores propriedade mecânicas ao material final.

O processo de preparação da amostra é importante para a otimização da análise. Com isso, é necessária uma camada de cobertura da superfície da amostra por uma película metálica ou de carbono, sendo estes, bons condutores de elétrons (BRANDÃO, 2004).

Um feixe de elétrons é convertido a um ponto que incide na superfície da amostra. Parte do feixe é refletida e coletada por um detector que converte este sinal em imagem (PHIL; RAINFORTH, 1994). A microscopia possui dois tipos de detectores, um de elétrons secundários e outro de elétrons retro-espalhados. Os elétrons secundários são gerados em volume pequeno e de mesmo diâmetro do feixe de elétrons incidentes. Possuem excelente resolução de imagem, podendo atingir aumentos elevados (30.000 vezes a 100.000 vezes).

O contraste da imagem gerada por elétrons secundários depende da massa específica e da topografia da amostra. Os elétrons retro-espalhados são gerados em volume maior e mais profundo que os elétrons secundários, sendo assim, responsáveis por imagem com média resolução. O contraste depende, além da massa específica e da topografia, da composição química (média do número atômico) do material da amostra.

Para observar os efeitos das condições de desidratação do minério de gipsita, sobre a formação de cristais, foram preparadas amostras de gessos convencional e reciclável, para observações das mesmas por microscopia eletrônica de varredura (MEV: JSM 5600 LV JEOL,) pertencente à Universidade Católica de Pernambuco (Figura 21). As amostras de

gesso não foram submetidas a tratamentos especiais como o de metalização, para serem observadas ao MEV e foram fixadas ao suporte do microscópio por uma cola de carbono.



Figura 21 – Microscópio eletrônico de varredura da Universidade Católica de Pernambuco

3.4 Propriedades do Gesso Produzido

A utilização do gesso na construção civil é regulada pela norma NBR – 13207: Gesso para Construção Civil, de outubro de 2004.

A norma define gesso para construção como: “Material moído em forma de pó, obtido da calcinação da gipsita, constituído predominantemente de sulfato de cálcio, podendo conter aditivos controladores de tempo de pega”.

Para a aplicação dessa norma é necessário consultar (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2005):

- NBR 12127/1991 – Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio.
- NBR 12128/1991 – Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta – Método de Ensaio.

- NBR 12129/1991 – Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas da pasta – Método de Ensaio.

- NBR 12130/1991 – Gesso para construção - Determinação de água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidro sulfúrico – Método de ensaio.

A Tabela 3.4 apresenta as especificações relacionadas às propriedades físicas e mecânicas de maior interesse em um gesso para a Construção Civil.

Tabela 3.4 - Exigências com relação às propriedades físicas e mecânicas do gesso para uso na construção civil

Determinações físicas e mecânicas	Norma	Limite
Resistência à flexão, MPa	NBR 12129	> 4
Dureza, MPa	NBR 12129	> 30
Massa unitária, g/L	NBR 12127	> 700

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Amostras dos gessos produzidos no reator batelada com alívio automático foram submetidas a análises para verificação das características das mesmas como material de construção. Como forma de comparar as modificações sofridas em termos de microestrutura entre o gesso convencional e o gesso beta reciclado, proposto neste trabalho, amostras de gesso comercial foram submetidas às condições de fotografia pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) e que pode ser observada na Figura 4.1. Na fotografia com uma ampliação de 3700 vezes pode-se observar as características cristalinas de uma amostra, a qual dá informação semelhante às demais. Trata-se de um material composto de cristais heterogêneos, na sua maioria pequeno e de aspecto quebradiço.

A fotografia da microestrutura do gesso beta, proposto como material reciclável, produzido sob controle de pressão, pode observada com auxílio da Figura 4.2. Na referida figura, também ampliada por um fator de 3700 vezes, é observada a formação de cristais bem mais homogêneos e alongados (do tipo agulha), os quais se entrelaçam e, por isso, podem ser responsáveis por propriedades que conferem maior resistência mecânica à amostra.

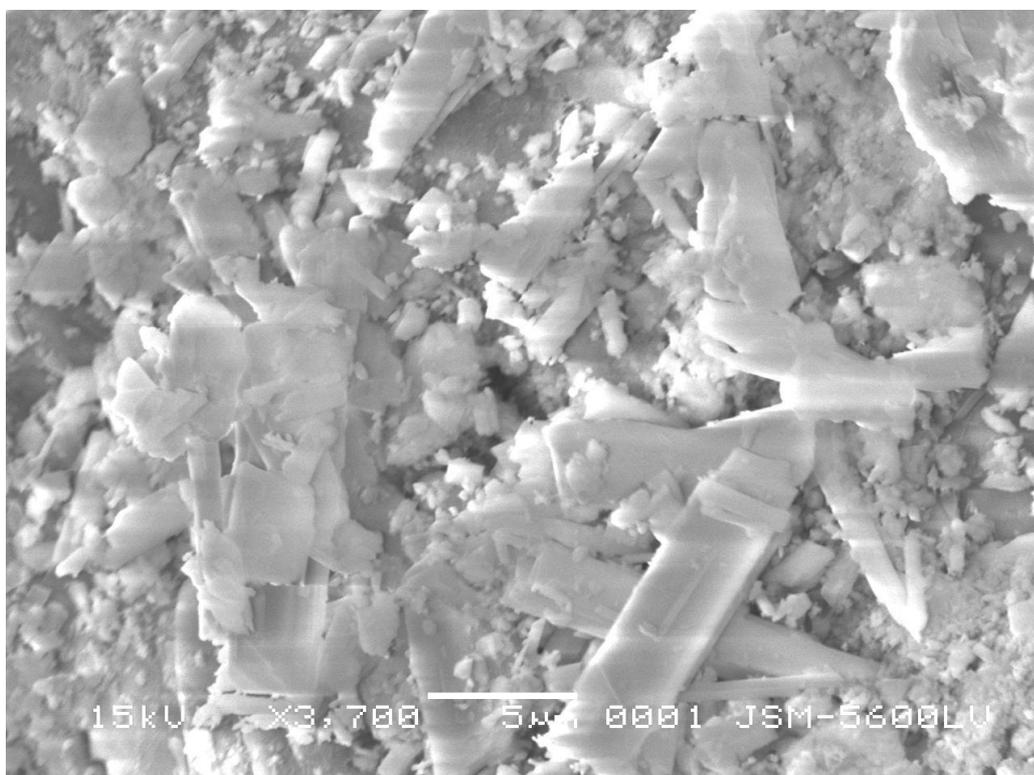


Figura 4.1 – Cristais de gesso produzidos sem controle de pressão e temperatura

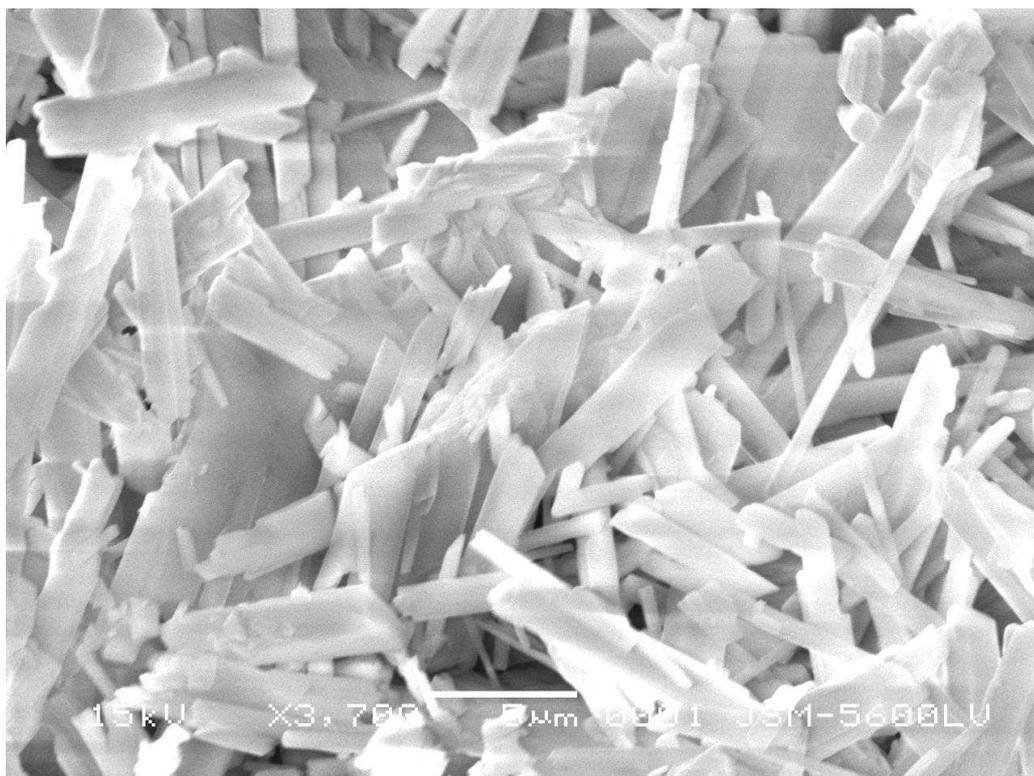


Figura 4.2 – Cristais de gesso produzido sob controle de pressão

Como resultados do planejamento fatorial completo do tipo 3^2 , com ponto central, a Tabela 4.4 apresenta a matriz de planejamento e as respostas obtidas. O conjunto de dados serviu para a entrada do software STATISTICA, utilizado neste trabalho.

A análise de variância de propriedades relevantes, como dureza, massa unitária e resistência à flexão para o gesso beta produzido, foram obtidas e são mostradas pelas Tabelas 4.1 a 4.3. Tais tabelas exibem parâmetros da análise de variância (ANOVA), demonstrando quais modelos matemáticos quadráticos ajustaram-se à previsão das propriedades relevantes citadas como função da pressão e da temperatura. testes estatísticos com valores de F e p ($< 0,05$) indicam a validade dos coeficientes obtidos pelos ajustes dos modelos aos dados experimentais.

As Equações de 4.1 a 4.3 apresentam os respectivos modelos matemáticos associados às previsões estatísticas de dureza, massa unitária e resistência à flexão:

$$D = 69,2105 + 9,2489 \cdot P - 10,5643 \cdot P^2 + 2,494 \cdot T - 7,9476 \cdot T^2 \quad (4.1)$$

$$MU = 793,119 + 16,3839 \cdot P - 11,2381 \cdot P^2 + 7,000 \cdot T - 35,0714 \cdot T^2 \quad (4.2)$$

$$RF = 4,380714 + 0,193333 \cdot P - 0,199762 \cdot P^2 + 0,034444 \cdot T - 0,433095 \cdot T^2 \quad (4.3)$$

	PRESSÃO	TEMPERATURA	M_UNITARIA	R FLEXÃO	DUREZA
1	-1,00000	-1,00000	743,0000	3,630000	44,50000
2	-1,00000	0,00000	752,0000	3,810000	49,40000
3	-1,00000	1,00000	730,0000	3,520000	38,79000
4	0,00000	-1,00000	732,0000	3,690000	53,20000
5	0,00000	0,00000	803,0000	4,550000	75,61000
6	0,00000	1,00000	754,0000	3,810000	58,30000
7	1,00000	-1,00000	745,0000	3,990000	58,15000
8	1,00000	0,00000	805,0000	4,860000	58,96000
9	1,00000	1,00000	792,0000	4,170000	72,31000
10	0,00000	0,00000	788,0000	4,330000	65,27000
11	-1,00000	-1,00000	745,0000	3,650000	42,10000
12	-1,00000	0,00000	759,0000	3,910000	48,55000
13	-1,00000	1,00000	728,0000	3,620000	38,46000
14	0,00000	-1,00000	739,0000	3,750000	54,50000
15	0,00000	0,00000	801,0000	4,490000	76,03000
16	0,00000	1,00000	749,0000	3,850000	59,10000
17	1,00000	-1,00000	743,0000	3,930000	57,98000
18	1,00000	0,00000	787,0000	3,900000	59,10000
19	1,00000	1,00000	769,0000	3,990000	69,97000
20	0,00000	0,00000	788,0000	4,350000	68,03000
21	-1,00000	-1,00000	740,0000	3,690000	42,10000
22	-1,00000	0,00000	757,0000	3,900000	53,98000
23	-1,00000	1,00000	725,0000	3,560000	39,01000
24	0,00000	-1,00000	750,0000	3,770000	55,01000
25	0,00000	0,00000	799,0000	4,620000	74,77000
26	0,00000	1,00000	783,0000	3,990000	64,48000
27	1,00000	-1,00000	755,0000	3,920000	57,99000
28	1,00000	0,00000	790,0000	3,880000	58,90000
29	1,00000	1,00000	788,0000	4,130000	70,01000
30	0,00000	0,00000	821,0000	4,770000	78,54000

Tabela 4.4 – Matriz de planejamento utilizada como dados de entrada do software STATISTICA, Versão 7 - StatSoft

Valores simulados versus valores experimentais, ilustrados pela Figuras (4.5), (4.9) e (4.13) ilustram os tipos de ajustes dos modelos em relação aos dados experimentais, tendo-se obtido variâncias explicadas (R^2) da ordem de: 0,75647; 0,66467 e; 0,76773 para os ajustes de massa unitária, resistência à flexão e dureza, respectivamente.

Os gráficos de curvas de níveis, responsáveis pela indicação de interação entre os fatores (maior interação quando menor for o paralelismo dessas curvas) são mostrados pelas Figuras (4.6), (4.10) e (4.14). Neste caso, os dados sobre a dureza do gesso produzido demonstraram haver menos interação entre os fatores que nos casos da massa unitária e módulo de resistência à flexão. Estas figuras justificam as ausências dos termos de interações entre as variáveis de temperatura e pressão.

Uma análise das superfícies de respostas também confirma as boas performances dos modelos estatísticos ajustados aos dados experimentais. As Figuras (4.7), (4.11) e (4.15) ilustram as regiões de pico das propriedades relevantes combinadas às curvas de contorno (curvas de níveis), também apresentados nos mesmos gráficos.

Tabela 4.1 – Parâmetros da ANOVA para a massa unitária

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	P - valor
(1) Pressão L+Q	5718,79	2	2859,39	13,517	0,000105
(2) Temperatura L+Q	9492,04	2	4746,02	22,435	0,000003
Erro	5288,66	25	211,54		
Total	21716,67	29			

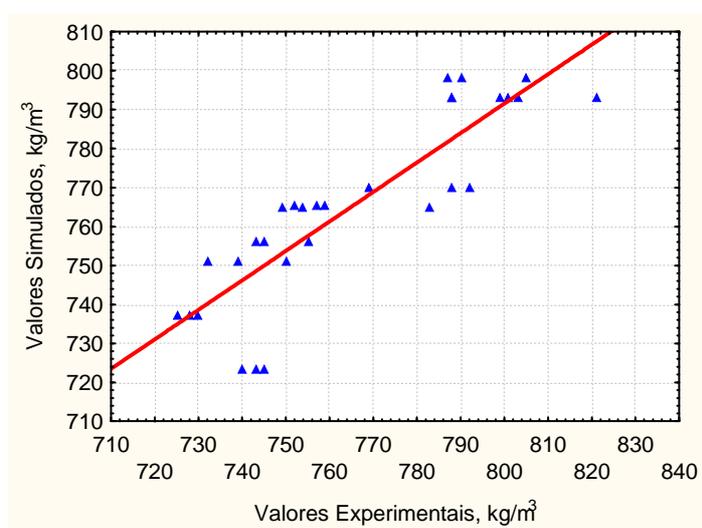


Figura 4.5 – Comparação entre valores simulados e experimentais: massa unitária

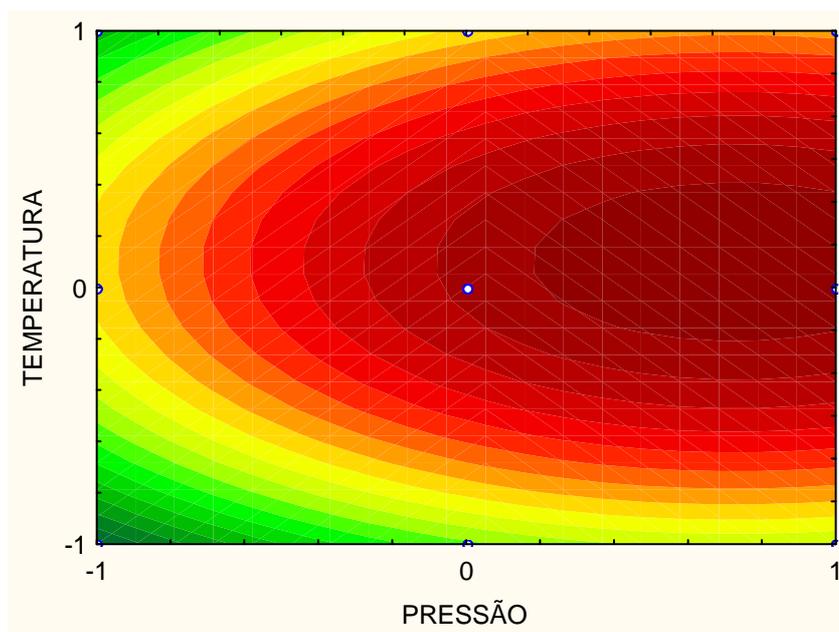


Figura 4.6 – curvas de nível: massa unitária

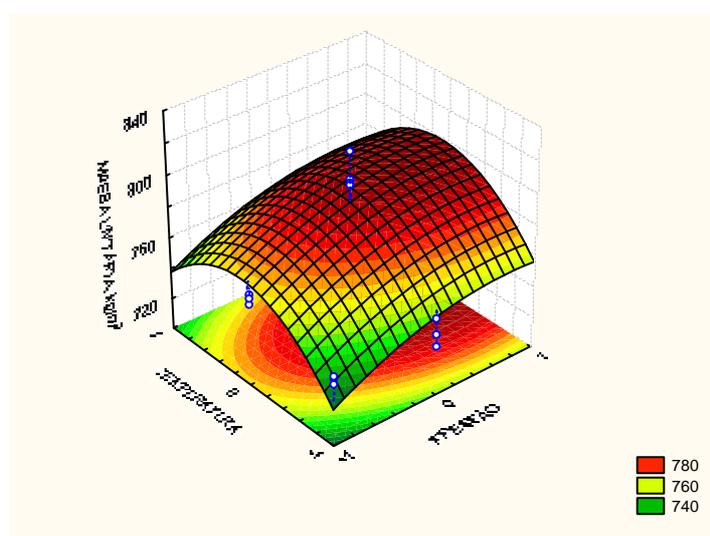


Figura 4.7 – Superfície de resposta: massa unitária

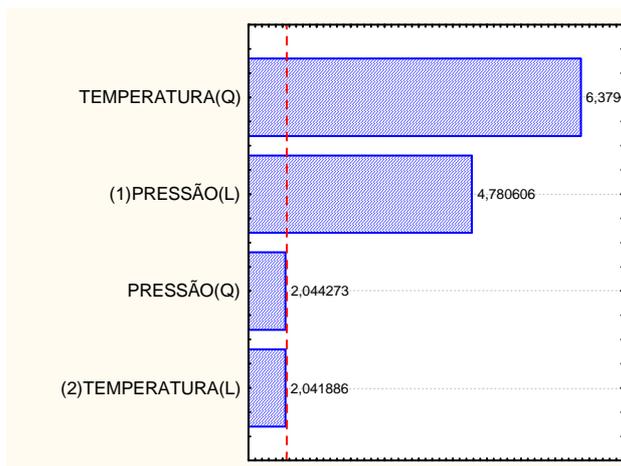


Figura 4.8 – Diagrama de Pareto: massa unitária

Tabela 4.2 – Parâmetros da ANOVA para a resistência à flexão

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	P - valor
(1) Pressão L+Q	0,95	2	0,48	9,289	0,000962
(2) Temperatura L+Q	1,33	2	0,67	13,018	0,000134
Erro	1,28	25	0,05		
Total	3,82	29			

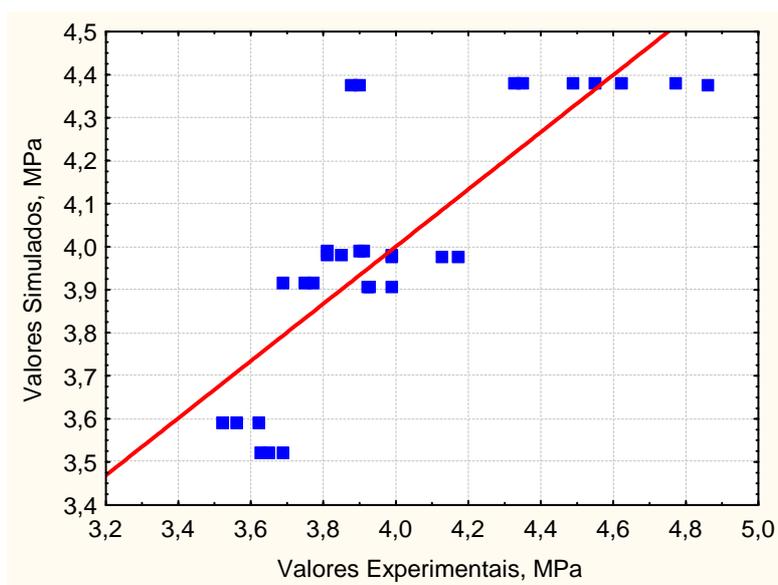


Figura 4.9 – Comparação entre valores simulados e experimentais: resistência à flexão

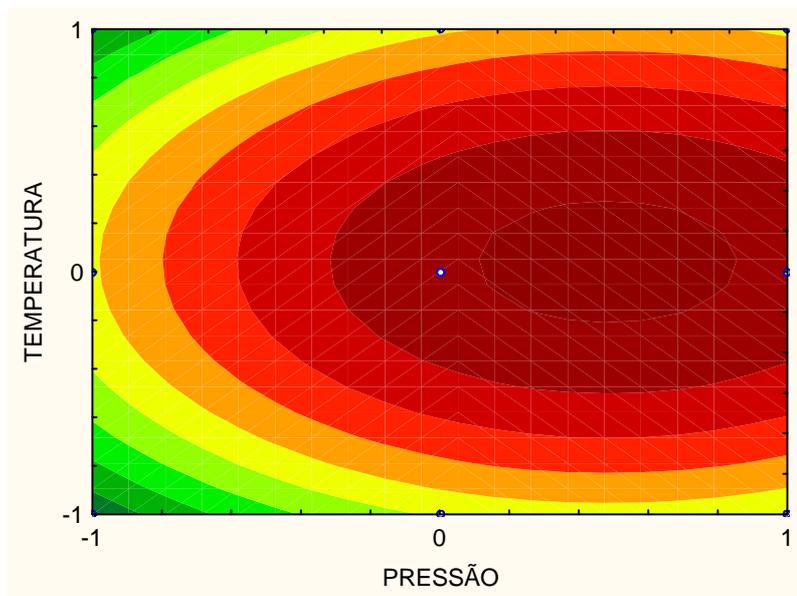


Figura 4.10 – Curvas de nível: resistência à flexão

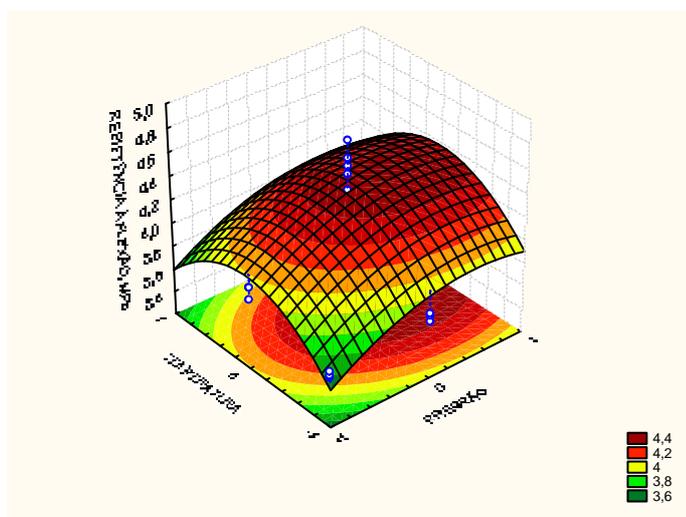


Figura 4.11 – Superfície de resposta: resistência à flexão

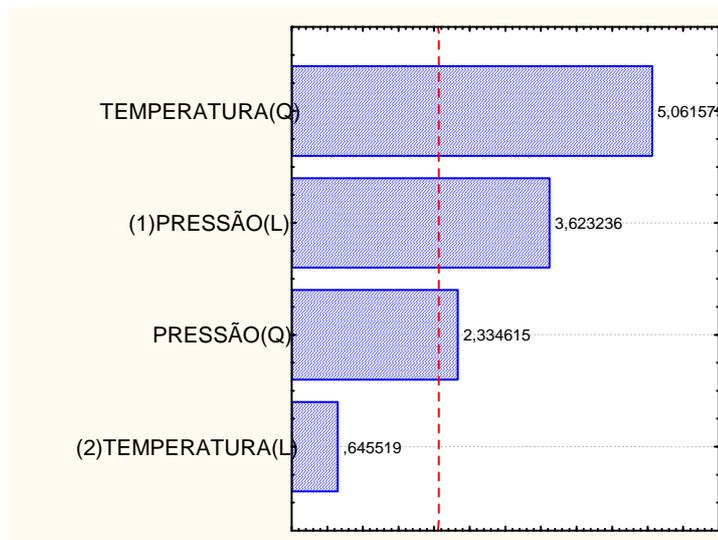


Figura 4.12 – Diagrama de Pareto: resistência à flexão

Tabela 4.3 – Parâmetros da ANOVA para a dureza do gesso reciclado produzido

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	$F_{\text{calculado}}$	P - valor
(1) Pressão L+Q	2320,98	2	1160,49	30,819	0,00000
(2) Temperatura L+Q	554,15	2	277,07	7,358	0,003070
Erro	941,38	25	37,65		
Total	4052,98	29			

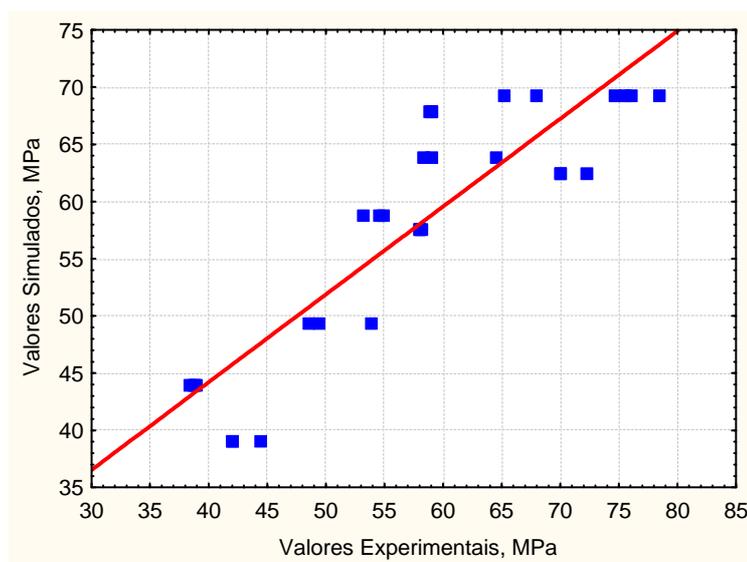


Figura 4.13 – Comparação entre valores simulados e experimentais: dureza

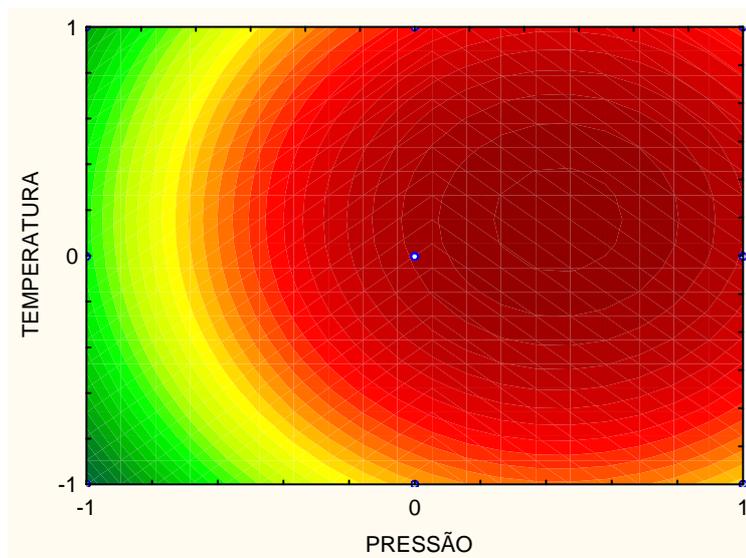


Figura 4.14 – Curvas de nível: dureza

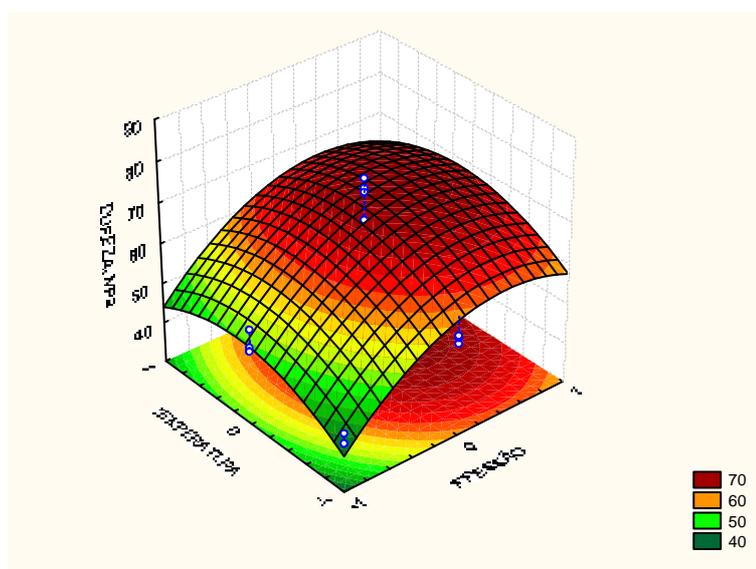


Figura 4.15 – Superfície de resposta: dureza

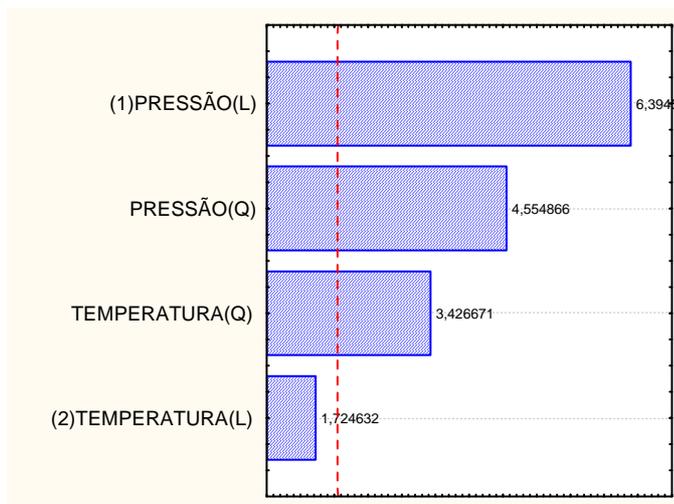


Figura 4.16 – Diagrama de Pareto: dureza

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Em trabalho anterior foram realizados esforços para demonstrar que a resolução do CONAMA n° 307/02, a qual classificou em material do tipo C o resíduo de gesso, deveria sofrer modificações, uma vez que o gesso produzido sob controle de pressão daria origem a um material reciclável. Neste trabalho foram realizados esforços para quantificar as condições operacionais otimizadas de produção de um gesso beta reciclável.

Fotografias obtidas por meio de microscopia de varredura eletrônica, com um fator de ampliação de 3700 vezes, comprovaram as condições básicas adequadas para a produção de um gesso beta dentro de especificações requeridas pelas normas de qualidade da ABNT. Algumas falhas ainda encontradas com auxílio dessas fotografias podem ser corrigidas com a utilização de condições experimentais melhoradas pelo uso de um forno acionado e monitorado por mecanismos e estratégias mais precisos e adequadas, respectivamente.

O estudo estatístico envolvendo planejamento fatorial completo do tipo 3^2 , com ponto central, onde pressão e temperatura foram os fatores e a dureza, a massa unitária e o módulo de resistência à flexão foram as variáveis respostas, mostrou-se que, sob pressão em torno de 0,6 atmosferas manométricas e com a temperatura em torno de 170 °C, produz-se um gesso beta com as melhores propriedades de dureza, massa unitária e resistência à flexão.

Numa nova etapa de trabalho, poderão ser obtidos modelos cinéticos para que essas condições otimizadas possam ser repassadas por todas as áreas envolvidas na produção e utilização adequada do gesso como material de construção e de processos.

BIBLIOGRAFIA

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12127. **Gesso para construção - Determinação das Propriedades físicas do Pó.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12128. **Gesso para construção - Determinação das Propriedades físicas da Pasta.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12129. **Gesso para construção - Determinação das Propriedades Mecânicas.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 12130. **Gesso para construção - Determinação de água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidro sulfúrico – Método de ensaio.** Rio de Janeiro: 1991.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13207. **Gesso para construção civil.** Rio de Janeiro: 2004.

AGOPYAN, V. *et al.* **Alternativas para redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1998.

AGUIAR, G. **Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção.** 2004. 310 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ALVES, C. E. T., QUELHAS, O. L.G. **A Ecoeficiência e o Ecodesign na Indústria da Construção Civil. Uma Abordagem a Prática do Desenvolvimento Sustentável na Gestão de resíduos com uma Visão de Negócios.** Rio de Janeiro: Latec/UFF, 2004.

ANGELERI, F.B.; CARDOSO, P.S.; SANTOS, P.S. **As Gipisitas Brasileiras e sua Aplicação como Gesso na Indústria Cerâmica – Parte I.** Recife: Gypsum Fair 97, Anais, p.p. 61-65, 1997.

ANTUNES, R. P. N.; JOHN, V. M.; ANDRADE, A. C. **Produtividade dos revestimentos em gesso: influência das propriedades do material**. Simpósio Brasileiro de Gestão da Qualidade e Organização do Trabalho. Recife: Antac, 1999. CD-ROM.

ANTUNES, R. JOHN, V, **Conceito de Tempo Útil das Pastas de Gesso**. São Paulo: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, 2000.

AZEVEDO, G. O. D.; KIPERSTOK, A.; MORAES, L. R. S., Resíduos da construção civil em Salvador: os caminhos para uma gestão sustentável. **Eng. Sanit. Ambient.**, Vol. 110, Nº I, 65-72, jan/mar, 2006.

BALTAR, C.A.M.; BASTOS, F.F.; BORGES, L.E.P. **Variedades Mineratógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso**. In.: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Anais: Florianópolis, 2004. p.329.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**, 2ª ed., Campinas: Ed. Unicamp, 2002.

BASTOS, F. F.; BALTAR, C-A.M. - Avaliação dos processos de calcinação para produção de gesso Beta. In XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA. **Anais do Congresso**. Minas Gerais, 2003.

BERNSTEIN, H. **Bridging the globe: creating an international climate nncpl es and challenges of sustainable design and construction**. Industry and environment. Paris: UNEP IE, v. 29 nº2 April-June 1996.

BALL, C. M.; NORWOOD, L. S. Studies in System $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$: Part 6 – Surface chemistry and porosity of CaSO_4 hemidrates, **J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1**, 74, 1477-1487, 1968.

BORGES, L.E.P.; MELO, E.B. de; BARRETO, S. de B.; ASSIS, H.M.. de; MENOR. E.N.; BAZANTE, A.L.S. - **Caracterização Mineralógica/Cristalográfica da Gipsita do Araripe**. In.: XLI Congresso Brasileiro de Geologia, Anais. João Pessoa, 2002. p.184.

BRANDÃO, P. R. G. **Métodos de Instrumentação e Análise**. Apostila do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Minas e Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia, 2004. 127 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, Resolução 307, de 5 de Julho de 2002. **Diretrizes, critérios e procedimentos para a Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./legislacao/ndex.html&conteudo=./legislacao/conama02.html>. acessado em: 22 de jan. de 2004, 17:20:00.

CARDIM, Arnaldo C F; OLIVEIRA, Maria Antonieta. **Resíduo da Construção e Demolição**, Recife, 2003.

CARDIM, Arnaldo. **Análisis del Ciclo de Vida de Productos Derivados Del Cemento – Aportaciones al Análisis de los Inventários Del Ciclo de Vida Del Cemento**. Universidade Politécnic de Catalunya, UPC, Espanha, 2001.

CARVALHO, M. T. M., TUBINO, R. M. **Estudo do Reaproveitamento dos Resíduos do Gesso na Confeção de Tijolos e suas Aplicações na Construção Civil do Estado de Goiás**. São Paulo: IBRACON, 2003.

CASPAR, J. P; DANY, C.; AMATHIEU, L.; REYNAUD, P.; FANTOZZI, G. Influence of microstructure of set plaster on its mechanical properties. In: **Eurogypsum – XXI Congress**. Vesailles, 4-6 June, 1996. p. 52-61.

CAVALCANTI, L. B. **Determinação de condições operacionais adequadas na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. 2006. 130 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. (1988a), O gesso como material de construção - Composição química (1ª Parte), **Tecnologia de edificações**, Editora PINI, 53-56, São Paulo.

CIWMB - California Integrated Waste Management Board. **Drywall Recycling**. <http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/factsheets/Drywall.htm#Economics> – Acesso em: 22 de Set. de 2004, 14:10:00.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. (1988a), O gesso como material de construção - Composição química (1ª Parte), **Tecnologia de edificações**, Editora PINI, 53-56, São Paulo.

CINCOTTO, M. A.; AGOPYAN, V.; FLORINDO, M. C. O gesso como material de construção - Composição química (2ª Parte), **Tecnologia de edificações**, Editora PINI, 53-56, 1988.

DALINGAND, D. Le plâtre et se techniques de production, **Ciments, Bétons, Plâtre Chaux**, 2 (753) 83-88, 1985.

DE PAUW, C.; LAURITZEN, E.K.. **Disaster planning, structural assessment, demolition and recycling**. Londres, 1994.

DEGANI, Clarice M.; MELHADO, Sílvio B.; CARDOSO, Francisco F. **ANÁLISE ISO 14001:1996 X ISO 9001:2000 INTEGRANDO SISTEMAS**. Paraná: ENTAC, 2002. CD-ROM.

DEUTSCHIE INSTITUT FUR NORMUNG. **Building Plaster: requirements, testing control**. - DIN 1168: part 2, Berlin, 1975.

GOTO *et al.* The forms of calcium sulphate hemidrate, *Aust J.Chem.*, 19, 313-316. 1066.

GOVERNO DE PERNAMBUCO, Pólo Gesseiro. Disponível em http://www.pe.gov.br/investimentos_pologesseiro.htm. Acesso em 30 de maio de 2007.

GRIGOLI, Ademir Scobin. **ENTULHO DE OBRA – RECICLAGEM E CONSUMO NA PRÓPRIA OBRA QUE O GEROU**. Paraná: PCC – USP, 2000.

GUINÉE, J.B; HAES, H.A.U.; HUPPES, G. Quantitative life cycle assessment of Products: goal definition and inventory. **Journal of Cleaner Production**, Australia, 14 de Out. 1993. p.12.

HASELEINI, C. R. *et al.* Fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 81-88. 2002.

HINCAPIÉ, A. M.; CINCOTTO, M. A. Efeito de retardadores de pega no mecanismo de hidratação e na microestrutura do gesso de construção. **Ambiente construído**, v.1. São Paulo, 1997. p.7-17.

HOBBS, S. **Sustainable use of construction materials: Sustainable use of construction materials**. Proceedings. BRE, 1996.

HUMMEL, Hans-Ulrich. Recycling von Gipsplatten. **Beitrag zum Darmstädter Massivbau-Seminar**, Band 18, Oktober 1997

ITEC - INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA. **Guia d'aplicació del Decret 201/1994**, regulador dels enderrocs i altres residus de la construcció. Departament de Medi Ambient, Junta de Resius. Março de 1995.

ITEP, **Procedimentos para Ensaio Laboratoriais no Gesso e Pré-moldados**, Agosto, Recife, 2004.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION **Gypsum Plaster: determination of mechanical properties**. – ISO 3051, 1974.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; **Response surface methodology**, New York: Wiley, 2002.

JORGENSEN, D.B- **Gypsum and anhydrite**. In.: **Industrial, Minerals and Rocks**. 6ª edition. Carr, D. D. (Editor). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado, 1994.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A. Alternativa de gestão dos resíduos de gesso. In: contribuição apresentada a discussão da reformulação da Resolução CONAMA 307: RELATIVA A GESTÃO DO GESSO, 9., 2003, São Paulo. Trabalhos técnicos... Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/> Acesso em: 12 de jan. 2007.

JOHN, V.M.J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: **SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. São Paulo: Anais - IBRACON, 1999.

KALIL, S. J.; MAUGERI, F.; RODRIGUES, M. I. Response surface analysis and simulation as a tool for bioprocess design and optimization. **Process Biochemistry**, 35: 539-550, 2000.

KEBEL, H.L. **Construction Uses: Gypsum Plasters and Wallboards**. In.: 6^ª edition. Carr, D. D. (Editor). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado 1994.

LIMA, José Antonio Ribeiro. **Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e de Suas Aplicações em Argamassas e Concretos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1999.

LYRA, Antônio C., **O Mercado de Gipsita e Gesso no Brasil**, Recife: Prossiga, 2001.

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.

McADIE, H. G. The effect of Water Vapour Upon the Dehydrate of CaSO_4 *Canadian Journal of Chemistry*, 42, 792-80, 1964.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1994. 581 p.

MOISSET, J. **Review of the Main Processes Used for Plaster Production**. Recife: Editora da Gypsum Fair, 1997, 39 p.

MARVIN, E. **Gypsum Wallboard Recycling and Reuse Opportunities in State of Vermont**. Vermont: Vermont Agency of Natural Resources , 2000.

MURAT, M.; JEANDOT, G. Apport de la microscopie électronique à balayage pour l'étude des plâtres durcis : étude de l'influence de quelques modificateurs de peise. **Matériaux et Constructions**, v. 6, n. 32, p. 126-135, 1973.

PEC, Andrew. **Waste Minimisation for Residential Construction Sites in the Barwon Region**. Australia, The Environmental Engineer. vol 3, Nº 3, p. 22, 2002.

PERA, J. **State of the art report: use of waste materials in construction in western Europe**. In: seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção, São Paulo, 1996.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V A. **O GESSO: Produção e Utilização na Construção Civil**. Bagaço, Recife, 2001.

PHIL, W. E. L. D.; RAINFORTH, W. M. **Ceramic microstructures: property control by processing**. Chapman & Hall, 1994. p.125-221.

PINTO, P., **Reciclagem para 10 Cidades Brasileiras 2000**. www.reciclagem.pcc.usp.br . acesso em: 22 de dez. de 2002.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 1999.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos: uma estratégia seqüencial de planejamento**. 1ª ed, Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

RODDEWIG, D. La Cuisson du Plâtre dans un Four Rotatif Compact. **Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux**. 747, 96-103, 1984.

SAITO, T. Some Observation on Process of Dehydration and Rehydration of Gypsum by Means of Proton Magnetic Resonance, **Bull. Chem. Soc. Japan**, 34 (10), 1454-1457, 1961.

SANTOS, V. A., **Análise Cinética da reação de desidratação Térmica da Gipsita na Obtenção do Gesso Beta**. Tese de Doutorado, 1996, 135 p. Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos e Informática. Universidade Estadual de Campinas. Campinas – São Paulo.

SANTOS, V. A. **Propriedades e características do gesso**. Apostilha de Tecnologia do Gesso UNICAP, Recife, 2003.

SELMO, Silvia; GABAS, Sandra; TAKEASHI, Mário; AGOPYAN, Vahan; KAHN, Henrique; **Microestrutura de Pastas de Gesso de Construção – Efeito da Relação Água/gesso e de Alguns Aditivos, por microscopia Eletrônica de Varredura**. Gypsum Fair 97 – Anais, Olinda, 1997.

SILVA, M. G. da; SILVA, V. G. da. Painéis de vedação. In:_____. **Painéis de gesso acartonado**. Manual: Instituto Brasileiro de Siderurgia. Centro Brasileiro da Construção em Aço. Rio de Janeiro, 2004. p. 51-59.

SJOSTROM, E. **Service life of the building. In: Application of the performance concept in building**. Tel Aviv, 1996.

SKINNER, E.W. **Encyclopedia of Chemical Technology**, Vol. 4, Wiley-Interscience, New York, 1978.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da Engenharia Química**. LTC, São Paulo 2000.

SOIBELMAN, L. **As perdas de materiais na construção de edificações: suas incidência e seu controle**. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A.C.; AGOPYAN, V. **Perdas de materiais nos canteiros de obras. A queda do mito**. *Qualidade na Construção*, SindusCon/SP, ano II, nº 13, p.10-15, São Paulo, 1998.

STAV, E.; BENTUR, A. **Characterization of the Hydration Process of Calcium Sulphate Hemihydrate by Simultaneous Evaluations of Chemical and Physical Parameters**. *Advances in Cement Research*, v.7, n. 27, 1995.

SUMNER, M. E. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos. In: **SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA**, 1992, Uberaba. *Anais...* Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 7-40.

TANIGUTI, Eliana. **Vedação Vertical Interna de Chapas de Gesso Acartonado: método construtivo**. São Paulo – EPUSP, 2000.

TEÓFILO, F. R.; FERREIRA, M. M. Quimiometria: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Química Nova**, Vol. 29, No. 2, 338-350, 2006.

VELHO, J.; GOMES, C-; ROMARIZ, C- **Minerais Industriais**. Universidade de Aveiro, 1998.