



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO - UNICAP
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPESP
COORDENAÇÃO DE PESQUISA

JOÃO CARLOS CÔRTE REAL

**DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS
ADEQUADAS PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADO
DE GESSO DE ALTA RESISTENCIA MECÂNICA**

Recife

2009

JOÃO CARLOS CÔRTE REAL

DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS
ADEQUADAS PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADO
DE GESSO DE ALTA RESISTENCIA MECÂNICA

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

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Modelagem e Otimização de Processos

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Aline Elesbão do Nascimento

Recife

2009

C827d Côrte Real, João Carlos
Determinação de condições operacionais adequadas para
produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica /
João Carlos, Côrte Real ; orientador Valdemir Alexandre dos
Santos ; co-orientador Aline Elesbão do Nascimento, 2011.
48 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco.
Pró-Reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de
Processos Ambientais, 2011.

1. Resistência de materiais. 2. Gesso - Propriedades mecânicas.
3. Gesso - Testes de compressão. 4. Delineamento composto central
rotacional. I. Título.

CDU 620.1

Côrte Real, João Carlos

DETERMINAÇÃO DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS ADEQUADAS PARA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADO DE GESSO DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA - Recife, 2009. 48p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

1. DCCR 2. Resistência mecânica 3. Microestrutura 4. Relação água/gesso
I. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.
Centro de Ciências e Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
(UNICAP)

Prof. Dr. Emerson Alexandre de Oliveira Lima
(UNICAP)

Prof. Dr. Carlos Magalhães Baltar
(UFPE)

Defendida em 23 de Março de 2009

Coordenadora: Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki

AGRADECIMENTOS

A Deus, que vem guiando meu caminho e iluminando minha estrada.

Ao meu Pai Tarceu Mário Côrte Real (in memória) e a minha mãe Maria Neuza Côrte Real, pelos exemplos de caráter, honestidade, que sempre souberam vencer na vida com dignidade. Pelos ensinamentos, pela determinação de jamais desistir nas dificuldades da vida, pela dedicação, pela paciência, por tudo o que fizeram e sempre farão na minha vida. Com muito carinho dedico minha eterna gratidão.

Ao meu Orientador Professor Dr. Valdemir Alexandre dos Santos, pelos ensinamentos da vida, pela compreensão, pela paciência e pelo tempo dedicado a minha pessoa.

A minha Esposa Michele Macêdo pelo companheirismo, aos meus filhos Maria Eduarda Côrte Real e João Carlos Côrte Real Filho, pelo carinho, pelos doces sorrisos nos momentos amargos da vida.

Aos meus irmãos Bruno Côrte Real, Maria Clara Côrte Real, Marta Côrte Real e Paulo Mário Côrte Real pelos conselhos e pela força nos momentos difíceis. Aos meus sobrinhos, tias, primos, cunhados, e amigos de infância por existirem.

À Tecomat em nome de Dr, Joaquim Correia de Andrade e Tibério Wanderley de Andrade.

À Construtora Moura Dubeux Eng. S/A, a toda sua diretoria, a todos os funcionários que compõem essa imensa família, em especial, ao superintendente Dr. Marcos Ely e a coordenadora do SGI Dr^a. Cecília Helena.

Aos colegas de turma pelos seguidos meses de encontros, conversas e trocas de experiências e aos demais professores.

“Naquela mesa está faltando ele e
a saudade dele está doendo em mim”

Sérgio Bitencurt

RESUMO

Os pré-moldados de gesso são largamente utilizados na construção civil para o acabamento de interiores, devido a propriedades acústica, térmica, elétrica e, principalmente, por ser um produto de custo relativamente baixo. No Pólo Gesseiro Pernambucano, localizado na Região de Araripe, semi-árido nordestino, alcança-se anualmente 90 % da produção brasileira de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) e seus derivados, estimada em cerca de 2 milhões de toneladas. Existem hoje no Pólo Gesseiro mais de 150 fábricas de pré-moldados e os produtos principais são as placas e os blocos de gesso. Esses pré-moldados de gesso são produzidos através de processo de hidratação do gesso, utilizando-se moldes específicos. São caracterizados por serem constituídos de material frágil, que possuem baixas resistências à compressão, à flexão e ao impacto. Sabe-se também que as características mecânicas dessas peças pré-moldadas dependem de diversos fatores, tais como: a natureza do gesso utilizado (gessos α e β) e do processo da preparação, como da consistência (relação água/gesso em peso) e da presença de aditivos. A introdução dessas últimas, por sua vez, reflete-se na elevação de custo do produto final e dificulta a reciclagem dos pré-moldados após o uso, sem contudo melhorarem as resistências mecânicas dos mesmos. Neste trabalho, as propriedades mecânicas dos pré-moldados de gesso- β foram modificadas a partir da redução da relação água/gesso e moldagem do pó úmido com auxílio de prensagem hidráulica, a exemplo do que existe de publicação em patentes. Contudo, um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e micrografias com auxílio da MEV foram utilizados para explicar e definir quais as condições adequadas de carga e de relação água/gesso para a produção de premoldados de gesso de alta resistência. A microscopia mostrou um alongamento e arrumação dos cristais, em forma de feixes paralelos, e uma redução significativa da porosidade na microestrutura do material após a conformação por prensagem. O DCCR mostrou que a o adicionamento de água em relação ao gesso próximo ao valor de 21,0 % (valor estequiométrico) reduz a contribuição da re-hidratação do semi-hidrato no aumento da resistência mecânica final.

Palavras-chave: DCCR, resistência mecânica, microestrutura, relação água/gesso.

ABSTRACT

The plaster cast are widely used in building to the finishing of interior, because the acoustic properties, thermal, electrical and, especially, as a product of relatively low cost. Plaster Pole of Araripe at semi-arid region, achieves 90% annually of the Brazilian plaster production, gypsum ore and its products, estimated at around 2 million tonnes. There are now in Plaster Pole more than 150 plants in plaster cast and the main products are the panels and blocks. These plaster casts are produced through a process of hydration of the plaster, using specific molds. Are characterized by being made of fragile material, which have low compressive strength, flexural and impact. It is also known that the mechanical characteristics of these casts depend on several factors, such as: the nature of used plaster, the factory process, the consistency (water/plaster weight ratio) and the presence of additives. The introduction of these latter, in turn, reflected in the increase of cost of the final product and makes the recycling of pre-molded after use, without improving the strength of them. In were modified this work, the mechanical properties of plaster cast from the reduction of the water/plaster and molding of wet powder with aid of hydraulic pressing, as there is published in patents. However a central composite rotational design (CCRD), Surface Analysis Method (SAM) and micrographs were used to explain and define what the appropriate ratio water/plaster to produce plaster cast high mechanical strength. Scanning Electronic Microscopy (SEM) showed an elongation of the crystals and storage, in the form of parallel beams, and a significant reduction of porosity in the microstructure of the material after shaping by pressing. The CCRD showed that when the water/plaster ratio close to 21.0% (stoichiometric value) reduces the contribution of re-hydration of the semi-hydrate in increasing of mechanical strength.

Keywords: CCRD, mechanical strength, microstructure, water/plaster ratio.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT.....	vii
CAPITULO 1	4
1.1 INTRODUÇÃO	4
1.2 OBJETIVOS.....	7
1.2.1 Objetivo geral.....	7
1.2.2 Objetivos específicos.....	7
1.3 REVISÃO DA LITERATURA.....	8
1.3.1 Delineamento Composto Central Rotacional	8
1.3.2 O gesso	11
1.3.3 Ação de Aditivos no Gesso	16
1.3.4 Moldagem por Prensagem.....	17
1.3.5 Pré-Moldados de Alta resistência Mecânica.....	23
1.3.6 Considerações Finais.....	23
1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
CAPITULO 2	29
INTRODUÇÃO	31
MATERIAL E MÉTODOS.....	33
Relação Estequiométrica Água/Gesso	33
Delineamento Composto Central Rotacional	33
Semi-hidrato Utilizado.....	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Micrografia dos cristais do gesso hidratado utilizado nos experimentos.....	37
Figura 2.2 – Micrografia dos cristais dos corpos de prova produzidos por	38
Figura 2.3 – Comportamento da resistência à compressão para os corpos	40
Figura 2.4 - Curvas de nível para a resistência à compressão dos corpos de prova	40
Figura 2.5 – Diagrama de Pareto para o modelo estatístico de resistência à.....	41
Figura 2.6 – Comparação entre valores simulados e experimentais do modelo estatístico para a resistência à compressão	42
Figura 2.7 – Comportamento da resistência à Flexão para os corpos de prova	44
Figura 2.8 - Curvas de nível para a resistência à flexão dos corpos de prova	44
Figura 2.9 – Diagrama de Pareto para o modelo estatístico de resistência à flexão	45
Figura 2.10 – Comparação entre valores simulados e experimentais do modelo estatístico para a resistência à compressão	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Alguns valores de α para diferentes valores de K.....	35
Quadro 2.2 – Valores das variáveis para o DCCR adotado	35

LISTA DE TABELAS

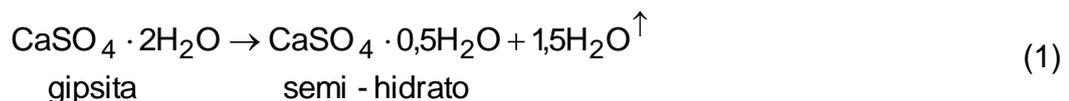
Tabela 2.1 – Matriz de planejamento resultante da aplicação de um DCCR.....	36
Tabela 2.2 - Dados fornecidos pela ANOVA para a resistência à compressão dos	38
Tabela 2.3 - Coeficientes de regressão para o modelo estatístico de resistência à.....	39
Tabela 2.4 - Dados fornecidos pela ANOVA para a resistência à flexão dos corpos de.....	42
Tabela 2.5 - Coeficientes de regressão para o modelo estatístico de resistência	43

CAPITULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

O gesso é um dos mais antigos materiais de construção – era utilizado pelos egípcios a cerca de 4000 anos atrás na construção de pirâmides e os gregos utilizavam-no há 500 anos a.C.. É produzido pelo aquecimento do minério gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), em pó, o qual é convertido em semi-hidrato de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) por decomposição térmica. O semi-hidrato também tem aspecto de um pó branco. É conhecido como gesso de Paris, provavelmente porque foram encontrados grandes depósitos de minério de gipsita nos arredores da Cidade Luz.

O minério gipsita é transformado em gesso com auxílio de grandes fornos, podendo estes ser dos tipos rotativos, marmitas, a leito fluidizado, ciclones calcinadores entre outros. Um bom contato entre as partículas de gipsita com os gases de aquecimento e/ou superfície de contato e uma granulometria adequada são parâmetros essenciais para uma conversão desejada. Os vapores de água formados durante a reação de conversão:



São descartados pela parte superior do forno de calcinação como são chamados de forma geral esses equipamentos (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

Durante a reação de desidratação térmica da gipsita são necessários controles adequados sobre os níveis de temperatura e pressão, a partir dos quais se pode obter um semi-hidrato com cristais bem formados, dando origem a um material reciclável (CAVALCANTI, 2006; MONÇÃO JÚNIOR, 2008). Quando certa quantidade de água é adicionada ao gesso o material re-hidrata. Esta re-hidratação

é acompanhada por um aumento de temperatura e uma leve expansão da pasta de gesso, criando condições para um perfeito preenchimento de moldes.

Atualmente o uso de gessos inclui a fabricação de argamassas para revestimento de paredes, placas para revestimento de tetos, placas reforçadas com fibras de vidro, carga para papel, tinta, creme dental e plástico, moldes para estatuetas e diversas outras aplicações (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

A maioria das aplicações para o gesso envolve a adição de água para a moldagem da pasta e obtenção de peças pré-moldadas. A adição dessa água encontra-se diretamente ligada a sua microestrutura. Cristais bem formados requerem menor quantidade de água, em quanto que aqueles mal formados requerem mais água. Durante o endurecimento da pasta o aquecimento provoca evaporação da água excedente (comparada com a quantidade estequiometricamente necessária). Quanto maior a porosidade do gesso menor sua resistência mecânica. Quanto maior a quantidade de água para formação da pasta maior a porosidade formada e, conseqüentemente, menor a resistência mecânica do material. Entretanto, a redução da quantidade de água fica condicionada à obtenção de moldes. Pouca água reduz a fluidez da pasta e a possibilidade de se obter moldes mais precisos, embora o material resultante passe a apresentar uma maior resistência mecânica (SOUZA, 2003).

Uma estratégia bastante utilizada para dar ao gesso propriedades especiais como maior dureza e menor ou maior tempo de pega tem sido o uso de aditivos (BADENS; VEESLER; BOISTELLE, 1999). A utilização dessas substâncias (amido, citratos, ácido cítrico, lignosulfonatos, sulfatos, detergentes, etc.) tem sido recomendada para percentuais iguais ou menores que 0,25 %, com vistas ao custo do produto final, uma vez que os custos desses aditivos são, em geral, bem mais elevados que o correspondente ao de igual quantidade de gesso. Outro fato importante de ser comentado é que na maioria das vezes existe uma influência considerável da adição dessas substâncias com redução da resistência mecânica dos pré-moldados produzidos com gessos aditivados.

O presente trabalho realiza um estudo experimental para a definição de parâmetros operacionais adequados para um processo de produção de pré-moldados de gesso com alta resistência mecânica. Esse gesso pretendido deve ter resistência mecânica suficiente para se tornar um material de construção mais atrativo e com capacidade para minimizar a geração de resíduos. Com a revisão atualizada da literatura verifica-se a falta de informações sobre estratégias de obtenção de gessos mais resistentes sem a utilização de aditivos químicos, em função da alta competitividade na área de desenvolvimento tecnológico na área gesseira.

No Capítulo 2 deste trabalho apresenta-se, em forma de artigo científico e enviado para publicação em periódico da área, a metodologia utilizada para definir condições operacionais adequadas de obtenção de um gesso mecanicamente mais resistente, sem a recorrência a aditivos químicos.

A disposição de gesso em aterros sanitários não é prática recomendada, exceto quando enclausurado e sem contato com a matéria orgânica e água, uma vez que em contato com umidade e condições anaeróbicas, pode formar gás sulfídrico (H_2S), que é tóxico e inflamável (MUNHOZ, 2008). Dessa forma, uma das grandes vantagens da metodologia de produção de pré-moldados abordada por este trabalho é de que, mesmo aqueles gessos que são produzidos em condições pouco adequadas (MONÇÃO JR, 2008), podem ser aproveitados, conseqüentemente, reduzir a geração de rejeitos que possam vir a prejudicar as condições desejáveis ao meio ambiente.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Determinar condições operacionais adequadas a um processo de produção de premoldados de gesso de alta resistência mecânica, utilizando um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), submetido a condições diferentes da re-hidratação convencional, ou seja, redução da relação água/gesso e conformação por prensagem.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar experimentos para obtenção de corpos de prova constituídos de semi-hidrato e água, a partir de valores estequiométricos para a relação água/gesso, e adensamento por prensagem mecânica.
- Observar modificações na microestrutura do gesso para explicar o efeito do adensamento dos corpos de prova por prensagem.
- Analisar os resultados das propriedades mecânicas dos corpos de prova utilizando a metodologia de análise da superfície de resposta.
- Verificar em quais condições operacionais as propriedades mecânicas dos corpos de prova podem conferir ao produto final características de um material de alta resistência mecânica.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Delineamento Composto Central Rotacional

O delineamento experimental foi desenvolvido por RAFISHER na Inglaterra na década de 1920. Naquele tempo, delineamento experimental era utilizado principalmente em pesquisas agrícola. A partir dos anos 1950, quando delineamento experimental começou a ser amplamente utilizado em estudos tecnológicos, em pesquisas conduzidas em tecnologia industrial, biologia, medicina, química etc. (LOGOTHETIS E WYNN, 1989). Atualmente, ele é amplamente considerado como uma das mais importantes técnicas utilizadas para o desenvolvimento de novos produtos. Os delineamentos foram desenvolvidos inicialmente para estudo de funções polinomiais de resposta na indústria, onde o erro experimental, em geral, é bem pequeno, e as condições do experimento são mais facilmente controláveis (BOX E WILSON, 1951).

Nessas condições é comum repetir apenas um tratamento, no caso, o relativo ao ponto central. Posteriormente, foram adaptados a outros ramos da ciência. Várias modificações têm sido propostas, tendo como base os delineamentos centrais e não centrais. Dentre os delineamentos padrões, o delineamento composto central (DCC), é considerado um delineamento ótimo. De acordo com (ATIKISON E DONEV, 1992), os delineamentos composto pertencem a uma família de delineamentos eficientes, os quais requerem poucos ensaios para sua realização (LUCAS, 1976).

Delineamentos compostos centrais têm-se constituído em um competidor dos fatoriais e dos fatoriais fracionados. Esses delineamentos são bastante flexíveis, possibilitando aos pesquisadores, para um número determinado de fatores, escolherem entre várias alternativas, a que mais lhe convier: dependendo do valor de α escolhido é possível obter-se ortogonalidade, rotacionalidade ou ambas. A ortogonalidade propicia a estimação independente para os coeficientes do modelo e a rotacionalidade proporciona variâncias idênticas para pontos situados à mesma distância do centro em qualquer direção. Dependendo do número de pontos centrais

é feita uma distribuição conveniente, é possível dividir o delineamento em dois, três ou mais blocos, ortogonalmente, sem perder as características anteriormente mencionadas (CONAGIN, *et. al.* 1999),.

Sabendo-se que o que o delineamento composto central (DCC), possibilita ao pesquisador, para um determinado número de fatores, escolher entre os tipos ortogonais e ou rotacionais permitindo ainda sua divisão ortogonalmente em blocos, bem como se pode trabalhar com um número bem menor de combinações entre fatores com seus respectivos níveis do que os fatoriais completos. O "projeto experimental é uma estratégica arma a nível mundial utilizada pelos concorrentes nas batalhas da concepção de novos produtos, reduzindo tempo, melhorando a qualidade e confiabilidade e reduzindo custo de ciclo de vida" (MATEUS, 2001). A principal vantagem para a adoção de projeto experimental é a obtenção uma incrível quantidade de informações sobre um novo produto com um número limitado de experimentos. Através da análise das informações obtidas a partir de experimentos, diversos parâmetros relativos a um novo produto podem ser facilmente determinados com precisão. Os principais passos para a utilização de delineamento experimental, em novos produtos desenvolvimento podem ser resumidos da seguinte forma:

- Identificar fatores que possam influenciar o desempenho de um novo produto;
- seleção adequada fatorial níveis;
- escolher a matriz de delineamento experimental;
- realizar experimentos e coleta de dados experimentais;
- análise de dados experimentais;
- determinação ótima fatorial valores;
- verificar a validade de ótima fatorial valores.

Muitos pesquisadores e profissionais discutem como usar o delineamento experimental na prática. (LIM, 1990) analisar as formas de melhorar a qualidade usando projeto experimental. (LOCHNER; MATAR, 1990), (LOGOTHETIS; WYNN, 1989) também, como fazer uso experimental para o desenvolvimento de produtos em seus livros. No entanto, existe de fato uma diferença entre a técnica de desenho

experimental e sua prática. Um exemplo é o seguinte: a conscientização, conhecimento e uso de modelos experimentais de design são muito pobres, mesmo em um dos maiores e mais bem sucedida empresas (CARLSSON, 1996). Em tal contexto, não é de estranhar que alguns designers ainda têm dificuldades em utilizar delineamento experimental na prática. A fim de proporcionar um melhor entendimento da utilização dessa técnica, e principalmente analisar a forma de uso experimental no desenvolvimento de um novo produto.

Verificou-se também que os experimentos fatoriais constituídos por muitos tratamentos propiciam maior número de graus de liberdade para estimativa do desvio do modelo, o qual, na maioria das vezes, não é significativo (BATISTA, 1976).

De acordo com (ATIKISON E DONEV, 1992), os efeitos dos pontos centrais faz diminuir a eficiência dos delineamentos como medida de otimalidade. Os delineamentos que o autor chama de Box Draper, por terem as características de rotacionalidade e um número de 2 a 4 pontos centrais (Na ausência de tornar o delineamento em blocos ortogonais), tem reduzidas as bordas da região experimental, permitindo assim a redução do efeito de viés dos termos de maior ordem que são omitidos do modelo, o que, segundo o autor, apesar de diminuir os custos, reduz a eficiência das medidas de otimalidade da região experimental, pelo menos para os modelos lineares.

Embora haja flexibilidade quanto ao número de pontos centrais é necessário pelo menos um. Multiplicar este ponto é fortemente recomendado nos três tipos de delineamentos indicados por ele. Os pontos centrais melhoram as estimativas dos efeitos quadráticos e possibilitam graus de liberdade adicionais para o erro. Além disso, os pontos centrais permitem informação extra quanto a região experimental, onde os melhores valores-resposta estão frequentemente localizados.

Delineamentos experimentais foram utilizados na otimização de processos biotecnológicos. As duas características mais desejáveis de um projeto experimental são ortogonalidade e rotabilidade. Ortogonalidade garante que o principal efeito e

interação das estimativas de interesse, são independentes umas das outras (ATIKISON E DONEV, 1992), Em outras palavras, quanto mais ortogonal a concepção é, quanto mais informação independente podem ser extraídos a partir dos resultados sobre os efeitos da juro. Por outro lado, a forma de endereços rotabilidade extrair o máximo de informações de imparcial a concepção. Ortogonalidade e rotabilidade dependem do número de pontos no centro da concepção e no chamado axial distância α , que é a distância da estrela pontos a partir do centro do modelo.

1.3.2 O gesso

A gipsita é um dos mais velhos e versáteis material de construção do mundo. A gipsita é usada para fabricação de uma grande variedade de gesso, principalmente semi-hidrato, anidrita, pré-moldados de composições leves, cerâmicas, argamassas, moldes odontológicos, etc. Industrialmente a forma semi-hidrato é usada em larga escala para interiores e decorações de edifícios. Para isso, o semi-hidrato sofre pega rápida (LEIMEN, 1989) quando da adição de água devido ao seu processo natural de cristalização. Vários agentes químicos como ácido tartárico, ácido cítrico, fosfatos, etc., são empregados como retardadores dessa pega. Contudo, a adição de água não só promove a pega ou secagem rápida da pasta de gesso, mas pode promover variações das características mecânicas dos pré-moldados ou revestimento de paredes (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008). Em função dessa combinação de efeitos, muitas vezes indesejáveis, existe uma necessidade da realização de um considerável número de estudos.

Os efeitos de vários agentes químicos sobre o tempo de pega, módulo de resistência à compressão, dureza e microestrutura do di-hidrato resultante foram investigados por (SINGH E GARG, 1997) em uma faixa de pH entre 4 e 12, ajustado por adição de Ca(OH)_2 ou HCl à pasta de gesso. Encontraram que o fator retardamento não tem nenhuma relação direta com o módulo de resistência à compressão, porém o pH está certamente relacionado com a resistência à compressão. O valor máximo de resistência à compressão do di-hidrato, ou gesso re-hidratado, foi obtido para um pH 7. Observaram alterações nas morfologias dos

cristais com a adição de diferentes retardadores. Chegaram também à conclusão de que a dureza do gesso varia de acordo com a faixa do pH da solução aquosa, tanto quanto da natureza do retardador adicionado.

Módulo de elasticidade ou módulo de Young é uma medida da resistência de um dado material à deformação elástica. O comportamento desse tipo de propriedade para o gesso foi estudado por (BADENS, *et al.* 1999) em atmosferas úmidas. Um primeiro conjunto de amostras foi preparado de semi-hidrato beta e água. A razão entre água e semi-hidrato, W/H, necessária para completar a reação de hidratação deve ser igual a 0,186. Um excesso de água, necessário na prática para que ocorra uma boa mistura, é responsável pela formação da porosidade no gesso. Neste estudo adotou-se uma razão W/H igual a 0,8, obtendo-se com isso uma porosidade (fração volumétrica) nos corpos de prova de 57 %, a 18 °C. Nesta temperatura a umidade relativa do ar, na qual o gesso é estável varia entre 12 e 100 %. A saturação de 1 atmosfera de ar por água corresponde a uma pressão parcial de água igual a $2 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2$. Uma segunda série de amostras contendo 100 ppm de ácido tartárico foi preparada pelo mesmo processo descrito anteriormente. O aditivo foi incorporado à pasta de gesso como solução aquosa.

Os corpos de prova de dimensões 125 x 50 x 30 mm tiveram os valores de seus módulos de elasticidade verificados com auxílio de um aparelho do tipo GrindoSonic, de fabricação belga, cujos valores resultantes das medidas foram calculados através de relações propostas por (SPINNER E TEFFT, 1961), para uma barra de secção reta retangular. As amostras eram mantidas em uma câmara na qual a pressão parcial da água era fixada através de equilíbrio entre soluções salinas saturadas e a atmosfera.

À temperatura ambiente (18 °C) o módulo de Young para corpos de prova de gesso após a pega, diminuiu com o aumento da umidade do ar. Simultaneamente, mostrou-se que a espessura da camada de água adsorvida nas vizinhanças dos grãos de cristais de gesso divergiram. Pequenas adições de ácido tartárico previnem a adsorção de água nas vizinhanças dos grãos de gesso a redução do módulo de Young.

A cristalização do di-hidrato de sulfato de cálcio, originado de uma suspensão aquosa de semi-hidrato é conhecida como pega do gesso. (BADENS, VEESLER E BOISTELLE, 1999) obtiveram resultados práticos de estudos sobre essa cristalização na presença de diferentes ácidos. A influência da presença de aditivos sobre a cinética de reação de cristalização e sobre a morfologia dos cristais de gipsita foram estudados. A taxa do efeito de retardo foi determinada registrando-se, em função do tempo, a condutividade da suspensão de semi-hidrato. Os resultados foram correlacionados às quantidades de aditivos adsorvidos e incorporados durante a cristalização. A influência de diferentes aditivos sobre a morfologia de um cristal de gesso obtido por re-hidratação da gipsita foi também investigada e discutida. O semi-hidrato beta foi obtido por cortesia da LAARGE (França) e os ácidos policarboxílicos tinham graus de pureza pa. A condutividade foi medida utilizando-se um condutímetro Metrohm 660 (Suíça). Os cristais foram observados com um da marca, Scanning Electronic Microscopy, modelo JEOL 6320F. Os experimentos foram realizados em um cristalizador do tipo batelada de 0,5 litros. O cristalizador confeccionado em vidro era do tipo encamisado e com agitador e chicanas. A agitação da suspensão era realizada com um equipamento construído em aço inoxidável a uma velocidade de 300 rpm.

Os resultados do trabalho realizado por (BADENS, VEESLER E BOISTELLE, 1999) mostraram que a adsorção/incorporação e taxa de retardamento da pega estão correlacionados entre si. Esta taxa de retardamento é diretamente proporcional à concentração inicial dos aditivos. Uma relação óbvia foi observada entre a velocidade do efeito de retardo e a competição entre as faces dos cristais envolvidos e a conformação das moléculas de aditivo.

Como se sabe, existem duas variedades de semi-hidrato, alfa e beta, ambas sendo semi-hidrato do sulfato de cálcio. O mais comumente utilizado, semi-hidrato beta ou gesso β , é misturado com uma massa de água da ordem de 80 % de seu próprio peso (geralmente entre 60 e 100 %). A reação de hidratação completa leva em torno de uma hora. O mecanismo consiste na dissolução do semi-hidrato e cristalização do di-hidrato que tem muito menor solubilidade. A pega do gesso dá

então origem a em engradamento composto por bastões de di-hidrato de 15 a 25 μm de comprimento e dimensões laterais da ordem de 1 a 1,5 μm .

Um modelo objetivando explicar muitas características microscópicas do gesso re-hidratado em atmosferas úmida e seca foi apresentado por (CHAPPUIS, 1999). A pega do gesso resulta em uma estrutura em forma de grade compostas de bastões de gipsita e o modelo proposto pelo referido autor implica na existência de finas camadas compostas de moléculas de água entre esses bastões, nas zonas onde eles estão em contato. O efeito das forças entre partículas, semelhantes as forças de van der Waals e interação entre duas camadas é importante apenas para objetos no domínio coloidal. No caos dos gessos após a pega, por causa do muito bom paralelismo das faces dos cristais, como forças exercidas por eles mesmos sobre grandes áreas e são, para uma grande parte, responsáveis pela coesão e resistência mecânica do gesso. Durante a secagem do di-hidrato originado da pega do gesso o efeito da capilaridade também deve ser levado em conta e tornam-se importantes quando a quantidade de mistura é menor que 2 % do peso do material. A partir deste momento a água líquida que permanece está na forma de menisco com pequena curvatura, nas vizinhanças dos diferentes nós das zonas de contato. Na ausência de forças externas aplicadas às amostras a espessura de cada filme de água corresponde à distância para qual as interações repulsivas da dupla camada equilibram a soma das forças atrativas de van der Waals e de capilaridade. Espera-se que a espessura das moléculas de água que separam as faces das moléculas de di-hidrato são em torno de 125 A° para o gesso após a pega saturado de água e cerca de 15 A° para o gesso seco. Neste caso espera-se que as moléculas de água estejam regularmente distribuídas semelhante a um cristal sólido, resultando em muito fortes forças de adesão entre os nódulos do gesso. Embora o modelo proposto pelo referido autor leve em conta forças entre partículas e de capilaridade, pode ser usado para explicar a coesão de muitos outros minerais obtidos por processos de cristalização. Particularmente, considera-se materiais cuja dureza baseia-se na presença de cimento e as propriedades físicas desses materiais são descritas. A grande parte das pastas de cimento hidratado é constituída de géis de CSH (Calcium Silicate Hydrates) que são partículas muito pequenas de hidrato de silicato de cálcio associadas com quantidades variáveis de água.

Para explicar a coesão do cimento a partir do modelo proposto por (CHAPPUIS, 1999), uma nova descrição da estrutura interna do gel de CSH foi necessária. As partículas de CSH que repelem uma as outras a pequenas distâncias não têm nenhum contato sólido. Elas são arranjadas em camadas paralelas com filmes finos de líquidos separando-as, formando assim folhas de grandes dimensões. Essas folhas preenchem parcial ou totalmente os espaços entre outros produtos de hidratação em pastas de cimento diluída ou densa, respectivamente. Durante a secagem os filmes de líquido tornam-se cada vez mais finos, resultando numa contínua variação da porosidade interna da pasta de cimento hidratada. Todas essas previsões convergiram com resultados experimentais apresentados pelo autor.

A morfologia dos cristais no gesso após a pega é resultado das condições da reação de hidratação. Pelas variações dos parâmetros de cada etapa da cristalização (dissolução, nucleação e crescimento) são obtidas várias microestruturas no produto final. As variações nas condições de hidratação interferem no grau de arrumação, textura e distribuição de tamanho dos cristais. Com base nessas premissas foram elaborados experimentos com amostras preparadas com variações de temperatura de reação ou da quantidade de semente de cristalização (JEULIN; MONNAIE; PÉRONNET, 2001). As amostras foram denominadas de “referência” quando preparadas a 20°C, “gipsítico” quando da adição de sementes de di-hidrato e “70 °C”. Com auxílio de um Scanning Electronic Microscope, foi possível fazer uma estimativa dos tamanhos dos cristais similares a barras paralelepípedicas, com dimensões l , L , e, como adotadas em (DANNY, *et al.*, 1996). Foram propostas caracterizações morfológicas e modelagens das microestruturas por meio de simples ferramentas matemáticas: modelo da microestrutura aleatória e modelo Booleano. Foi possível descrever a complexa geometria das texturas desenvolvidas em um gesso por meio de um modelo de meio aleatório, o modelo Booleano com cristais paralelepípedicos. Segundo os autores, essa primeira aproximação pode ser melhorada pela introdução de formas mais realísticas de agregados de agulhas, para melhor descrição do meio composto por gesso com textura do tipo gipsítico, ou uma modelagem mais complexa. Os modelos

foram usados para estimar algumas propriedades de contato entre os envoltórios dos cristais para serem relacionadas com a dureza do material e prever o comportamento elástico dos gessos a partir de suas morfologias. Contudo ainda existem enfoques a serem investigados para que mais propriedades físicas dos gessos possam ser previstas a partir das morfologias desses materiais.

Sabe-se que o gesso é um material frágil e que tem na compressão uma resistência maior que na flexão e ao impacto. As características do gesso após a pega dependem fortemente de um certo número de fatores que influenciam sua morfologia e suas propriedades microestruturais. Esses fatores são notavelmente relacionados à natureza do material inicial (gesso- α ou β) e do processo de fabricação: condições de moagem, consistência (razão mássica água/material seco) e da presença de aditivos (XIUCHUN; CUIYU; BAIPING, 1986). Dessa forma alguns pesquisadores têm sido impulsionados a melhorar as propriedades mecânicas de gessos com auxílio da incorporação de materiais fibrosos.

A pega e as propriedades mecânicas de gessos foram investigadas com auxílio de diferentes técnicas: calorimetria adiabática e medidas da pressão de expansão e variações dimensionais durante a pega, avaliações de resistências à compressão e dureza, observações com SEM (GMOUH, *et al.*, 2003). Subseqüentemente a microestrutura dos corpos de prova foram modificadas incorporando-se grãos de gipsita de granulometria e concentrações controladas, ou pela aplicação de esforço de compressão durante a reação de hidratação. As correlações entre as características microestruturais e as propriedades mecânicas confirmaram o interesse nesses métodos de caracterização para gessos.

1.3.3 Ação de Aditivos no Gesso

É comum encontrar na literatura internacional trabalhos importantes como o de (MOISSEY, 1985) voltados para as influências de substâncias retardadoras ou redutoras do tempo de pega do gesso, também denominadas de aditivos, nas propriedades do gesso, visto que tanto no estado fresco quanto no estado

endurecido, certas propriedades são alteradas. No estado endurecido existe consenso de que há uma redução das propriedades mecânicas atribuída a uma mudança na microestrutura do material.

1.3.4 Moldagem por Prensagem

A prensagem é uma operação de moldagem baseada na compactação de um material granulado (pó) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de uma carga de pressão (AMORÓS ALBARO, 2000a). Essa operação tem como objetivo, de forma idêntica a qualquer operação de conformação, como colagem ou extrusão, obter peças uniformes, de acordo com dimensões e a geometrias pré-estabelecidas, contribuindo na obtenção de uma microestrutura adequada às características finais desejadas.

A prensagem compreende três etapas ou fases: (1) preenchimento da cavidade do molde, (2) compactação do material granulado e, (3) extração da peça. É o procedimento de conformação mais utilizado pela indústria cerâmica devido à sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional. (AMORÓS ALBARO, 2000a) distingue duas grandes modalidades de prensagem, a prensagem uniaxial e a prensagem isostática. Na primeira, a compactação do pó realiza-se em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de punções rígidos (Figura 1.1). É utilizada para conformar peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem.

Quando a espessura da peça que se deseja obter é pequena e sua geometria é simples, a carga pode ser aplicada em apenas um sentido (ação simples). Por outro lado, para conseguir peças de grande espessura e geometria complexa, com uniformidade de compactação, é indispensável que a prensagem seja feita nos dois sentidos (dupla ação), ou então que se empregue um molde complexo com múltiplos punções. O atrito entre os grãos ou partículas do pó e também entre eles e a superfície do molde impedem que a pressão, aplicada a uma ou mais das superfícies da peça, seja integralmente transmitida e, de forma uniforme, a todas as

regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade nos corpos conformados (Figura 1.2).

Na prensagem isostática, a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado. Este procedimento assegura uma distribuição homogênea da pressão sobre a superfície do molde. É empregado na fabricação de peças de formas complexas, que apresentem relevos em duas ou mais direções, ou em peças onde uma das dimensões é muito maior que as demais, como no caso de tubos e barras.

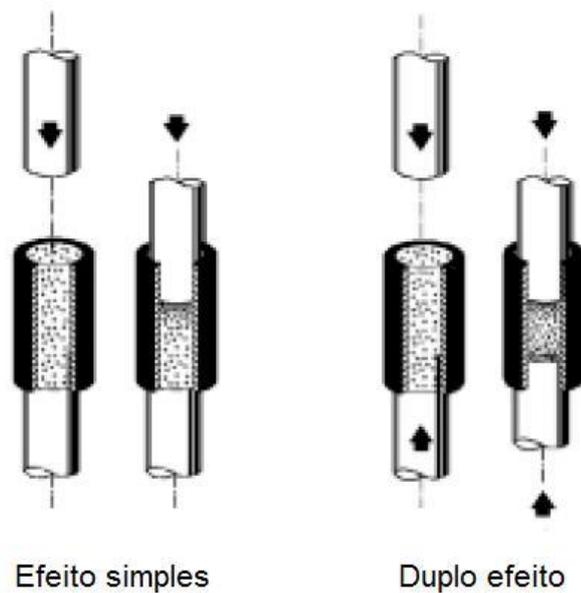


Figura 1.1 – Diferentes formas de adensamento por prensagem
Adaptado de (AMORÓS ALBARO, 2001)

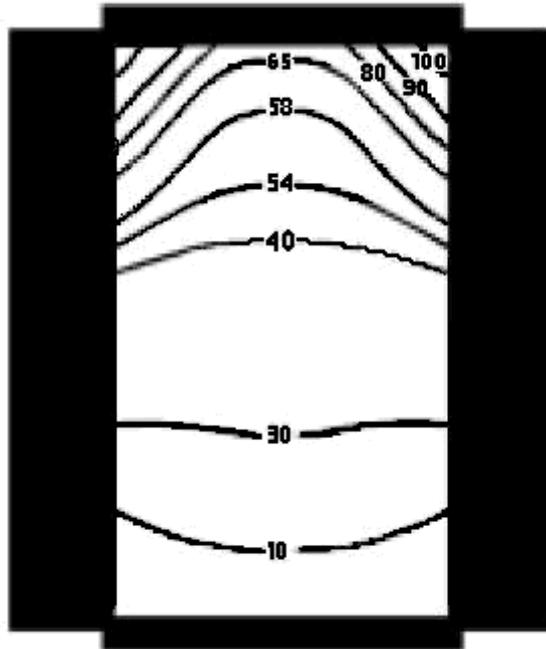


Figura 1.2 – Distribuição de pressões numa prensa
Adaptado de (AMORÓS ALBARO, 2000a)

Na compactação de um material granular a diminuição de volume dos poros e de seus tamanhos se dá através dos três mecanismos (AMORÓS ALBARO, 2000b):

- redução do volume ocupado pelos poros intergranulares e de seu volume, através do deslocamento e reordenação dos grânulos;
- redução do volume e tamanho dos espaços intergranulares por deformação plástica e/ou destruição dos grânulos, dependendo das características mecânicas do grânulo (dureza, deformabilidade, resistência mecânica) e;
- diminuição de volume e tamanho dos poros intragranulares pelo deslizamento e reordenação das partículas buscando alcançar um empacotamento de mais denso.

Segundo (AMORÓS ALBARO, 2000b) a destruição e/ou a deformação plástica das partículas que constituem os grânulos na prática nunca se dá em extensão apreciável, devido tanto a natureza frágil como a elevada dureza das partículas que constituem os materiais cerâmicos.

Segundo ainda (AMORÓS ALBARO, 2000b) de uma maneira geral, a compactação final da peça, por mais que se aumente a pressão de prensagem, é

sempre inferior a compactação que corresponderia ao empacotamento mais denso possível das partículas. Isto se deve a:

- formação de empacotamentos irregulares e porosos de partículas que resistem às altas pressões devido a sua fragilidade e dureza, ainda existindo entre elas altíssimas forças de atrito e;
- saturação dos poros da peça pelo conteúdo de ligantes e plastificantes líquidos, impedindo uma maior compactação.

A variação na compactação sofrida pela estrutura porosa submetida a uma prensagem, assim como a microestrutura resultante da peça, depende fundamentalmente do comportamento mecânico dos grânulos, que é função de suas características, e das características estruturais das partículas (forma, tamanho e distribuição) que formam os grânulos. A velocidade com que a carga é aplicada, bem como o tempo de permanência na carga máxima, exercem um grande efeito na recuperação elástica e na saída de gases durante a compactação. Entretanto, segundo (AMORÓS ALBARO, 2001), praticamente não exercem influências sobre a compactação e sobre a microestrutura da peça resultante.

Nos últimos anos, a economia sustentável a nível mundial tem prosperado significativamente e, cada vez mais, a qualidade de vida das populações pode ser considerada como intimamente relacionada com o uso de produtos alternativos na arquitetura e na construção, como por exemplo, os desperdícios industriais, convencionalmente designados como “materiais verdes”. Muitos desses trabalhos de investigação refere-se ao desenvolvimento de novos materiais compósitos à base de gesso, na maioria das vezes incorporando granulados de diferentes origens como madeiras, plásticos, cortiça, fibras de celulose de desperdícios de papel e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus usados. Estes compósitos poderão ser utilizados no fabrico de placas ou blocos para elementos de construção não estruturais, como por exemplo, paredes divisórias e revestimento de tetos ou paredes.

(HASELEIN, *et al.*, 2002) confeccionaram chapas aglomeradas, utilizando gesso como material cimentante e papel reciclável dissociado (jornal e offset) e

partículas de madeira de pinus como reforços. Em todos os tratamentos, a razão madeira (ou fibras) para gesso foi mantida em 0,25 (base seca) e duas dosagens de água (w) foram empregadas: 0,4 e 0,8, correspondendo à razão água/gesso. As chapas foram prensadas a frio em prensa de laboratório, em um processo similar à produção de chapas aglomeradas convencionais. As proporções de madeira ou fibras e gesso necessários para a fabricação de cada chapa foram calculados em termos de base seca. Antes da fabricação, determinou-se o teor de umidade de cada um dos componentes (flocos de pinus, papel jornal e papel offset possuíam um valor médio de umidade de 10%, enquanto que o gesso, 3%).

Após condicionadas em câmara climatizada, as chapas foram testadas em flexão estática, dureza, arrancamento de parafusos, absorção d'água e inchamento em espessura. Em geral, a adição de fibras causou melhoria nas propriedades mecânicas das chapas. Diferenças estatísticas significativas em relação à testemunha (gesso puro) foram encontradas para resistência à flexão estática, dureza e arrancamento de parafusos em relação a alguns dos tratamentos estudados. Já a inclusão de fibras de papel reciclável, com $w = 0,4$, não apresentou diferenças significativas em relação à testemunha para absorção d'água e inchamento em espessura. Os melhores resultados foram encontrados com papel jornal, com um coeficiente $w = 0,4$.

Foram estudados desenvolvimento de novos materiais compósitos à base de gesso incorporando granulado de cortiça, um subproduto da indústria da cortiça, fibras de celulose de desperdícios de papel e fibras têxteis provenientes da reciclagem de pneus usados (EIRES; JALALI; CAMÕES, 2007). Seguindo-se o desenvolvimento e caracterização dos compósitos com diferentes percentagens de cada material para se otimizar a incorporação de resíduos em função das resistências mecânicas pretendidas. A fim de melhorar a resistência à água e as propriedades mecânicas dos compósitos foi testada a incorporação, em quantidades reduzidas, de determinadas adições minerais ou poliméricas. Foram ainda estudados dois processos diferentes de produção dos compósitos, por moldagem simples ou por prensagem. Os novos compósitos desenvolvidos têm a particularidade de serem sustentáveis, devido aos seus componentes reciclados, e

permitem obter produtos com diferentes densidades segundo o processo de fabrico utilizado conforme as características pretendidas relativamente ao comportamento térmico e acústico.

Um método testado para reduzir a absorção de água consistiu em moldar os corpos de prova das misturas à base de gesso por prensagem. Com este procedimento foi possível minimizar a quantidade de vazios e reduzir a quantidade de água necessária para a mistura. Deste modo, produziu-se uma mistura muito mais compacta e, conseqüentemente, foi possível melhorar significativamente o seu desempenho (HERNÁNDEZ-OLIVARES, 1999). Assim, foi preparada uma mistura de gesso com apenas 20% de água (em massa de gesso), o que corresponde ao teor mínimo de água para hidratação. Foi, também, adicionada uma pequena quantidade de retardador de pega para aumentar o tempo de início de cura. Utilizando uma prensa hidráulica manual, foram produzidas amostras cilíndricas sob uma pressão de aproximadamente 275,8 kPa. Foram confeccionados corpos de prova com duas temperaturas diferentes (temperatura ambiente de cerca de 25°C, e 50°C) e ambas foram mantidas após a moldagem à temperatura ambiente até aos 7 dias de idade dos corpos de prova. Para serem testadas, as amostras foram conservadas numa câmara a 40°C para estabilizar a umidade contida. Após este período, as amostras foram submetidas a ensaios de compressão e absorção de água por imersão até 2 horas. Os testes de imersão foram realizados de acordo com a norma portuguesa NP 762, 1969. As amostras saturadas em água também foram submetidas a ensaios de compressão.

De acordo com (EIRES; JALALI E CAMÕES, 2007) a incorporação de granulado de cortiça ou fibras têxteis de pneu usado nas pastas e nas placas de gesso prensado é possível, mas reduz o seu desempenho mecânico. Contudo, esta limitação pode ser compensada, considerando a redução da densidade e a melhoria do gesso convencional em termos de comportamento térmico e acústico - propriedades que seriam testadas com a continuidade do trabalho. O trabalho mostrou que é possível reduzir significativamente a absorção de água por imersão, permitindo a aplicação das placas em zonas úmidas. A adição de fibras de celulose melhora o comportamento à flexão das misturas com maior quantidade de granulado

de cortiça ou fibras têxteis, provocando uma menor redução de resistências face ao gesso sem adições. Além disso, permite obter uma melhor coesão e acabamento das placas de gesso.

1.3.5 Pré-Moldados de Alta resistência Mecânica

A patente de um invento sobre a obtenção de um gesso de alta resistência mecânica e baixa permeabilidade foi solicitada pela FAPESP (2003). O processo de fabricação, tendo como objetivo a preparação de peças de gesso, utilizou como matéria-prima o Sulfato de Cálcio Hemihidratado ou o Fosfogesso. O pó do Hemihidrato foi uniformemente umedecido com uma quantidade de água ao redor de 20,0 gramas de água para cada 100,0 gramas de gesso seguindo-se de uma compressão uniaxial ou isostática. Este mesmo procedimento é empregado para na preparação de compósitos de gesso, inclusive com fibras vegetais, poliméricas e metálicas. Segundo os autores do invento esse tipo de gesso encontra aplicação na construção civil na forma de: i) placas de gesso reforçadas ou não por fibras; ii) vigas constituídas por placas de gesso reforçadas por arames de aço; iii) placas compostas de gesso e de polímeros para alto isolamento térmico e acústico; iv) placas e tubos com ultra baixa absorção de água.

1.3.6 Considerações Finais

Com base no presente levantamento pode-se perceber que até a presente data não houve desenvolvimento tecnológico que difundisse, na literatura, as condições operacionais otimizadas para obtenção de um gesso com elevação de suas propriedades mecânicas. As tecnologias dos usos de aditivos e incorporação de fibras de vidro, granulado de cortiça, fibras de celulose, rejeitos de pneus usados, aparas de papel reciclados, entre outros, têm demonstrado que o desempenho de gessos finais e compósitos ficam muito aquém de obtenção de um material estrutural. A difusão de resultados na área gesseira, pelas suas características comerciais, impede na maioria das vezes a divulgação desses resultados. Contudo, existem pontos importantes como as condições operacionais adequadas para

obtenção de um gesso com características estruturais. A determinação da quantidade de água de hidratação e os níveis de pressão adequados fazem parte dessas condições operacionais do processo.

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORÓS ALBARO, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial – Parte I: o preenchimento da Cavidade dos moldes. **Cerâmica Industrial**. 5(5), setembro-outubro, 22-28, 2000a.

AMORÓS ALBARO, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e Sua Aplicação Industrial – Parte II: a compactação. **Cerâmica Industrial**. 5(6), novembro-dezembro, 15-20, 2000b.

ATKINSON, A. C.; DONEV, A. N. **Optimum experimental Designs**. Oxford: Clarendon Press, 1992. (Oxford Statistical Science Series 8)

BADENS, E.; VEESLER, S.; BOISTELLE, R., Crystallization of gypsum from hemihydrate in presence of additives. **Journal of Crystal Growth**, 198/199, pp. 704-709, 1999.

BATISTA, L.B. **Determinação de α para tornar ortogonal o delineamento composto central (box)**. Dissertação de (Mestrado) – Escola Superior de Agrucultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1976

BOX, G.E.P E WILSON K.B. On the experimental attainment of optimum conditions. *J.R. Statist. Soc.*, B. 13 1 – 45, 1951

CARLSSON, M., **Conceptual and Empirical Aspects of TQM Implementation in Engineering Organizations**, The “R&D Management” Conference, Quality and R&D, Twente Quality Center, 6-8 March, Enschede, The Netherlands, 1996, pp. 84-99.

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 Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 2006.

CHAPPUIS, J., A new model for a better understanding of the cohesion of hardened hydraulic materials. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. No. 156, pp. 223-241, 1999.

CONAGIN, A. **Sensibilidade dos delineamentos fatoriais $(3)^3$, $(1/2)^4$ e $(1/5)^5$, na definição dos pontos crítico**. Campinas; Instituto Agrônomo de Campinas, 1999.

DANNY, C. et al., Influence de la microstructure du plâtre sur ses propriétés mécaniques. **Eurogysum**. 32, 1996.

EIRES R. JALALI S. e CAMOES A. **Novos materiais de construção a base de gesso e desperdícios industriais**, Congresso de construção – Universidade de Coimbra – Portugal, 2007.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-FAPESP (BR/SP). Milton Ferreira de Souza. Gesso e compósitos de alta resistência mecânica e baixa permeabilidade e seu processo de fabricação. BR, PI0303814-9, 09/09/2003. Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas. Minerais não metálicos. Disponível em: <http://sbtrv1.ibict.br/upload/sbrt584.pdf?PHPSESSID=5bb1f470a149e3a6595439e7301587ae> Acesso em: 19 de dezembro de 2008.

GMOUH, A. et al., Changes in plaster microstructure by pre-stressing or by adding gypsum grain: microstructural and mechanical investigations. **Material Science and Engineering A352**. pp. 325-332, 2003.

HASELEIN, C. R.; CALEGAR, L.; ALBERTI, L. F.; MINELLO, A. L.; da SILVA, P. A.; PINTOS, R. G. F. fabricação de chapas de partículas aglomeradas usando gesso como material cimentante. **Ciência Florestal**. Vol. 12, n. 1, 81-88, 2002.

HERNÁNDEZ-OLIVARES, F.; BOLLATI, M.R.; DEL RIO, M.; PARGA-LANDA, B. Development of cork-gypsum composites for building applications. **Construction and building materials**, n. 13, p.179-186, 1999.

JEULIN, D.; MONNAIE, P.; PÉRONNET, F., Gypsum morphological analysis and modeling. **Cement & Concrete Composites**. 23, pp. 299-311, 2001.

LIM, T.E., **Quality Improvement Using Experimental Design**, International Journal of Quality e Reliability Management Vol. 7 No. 1 – 1990, pp. 70 e 76.

LEIMEN, F. G., Influence of various retarders on the cristallization and strength of plaster of Paris. **Zement-kalk-Gips**, 5, 229-232, 1989.

LOCHNER, R.H. and MATAR, J.R., **Designing for Quality: An Introduction to the Best of Taguchi and Western, Methods of Statistical Experimental Design**, London: Chapman and Hall, 1990.

LOGOTHETIS, N. AND WYNN, H.P., **Quality through Design: Experimental Design, Off-line Quality Control, and Taguchi's Contributions**, Oxford: Clarendon Press, 1989.

LUCAS, J. M. Which Response Surface Designs is Best. *Thecnometria*, Alexandria, v 18 n. 4, p 411-417, 1976.

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

MONÇÃO JÚNIOR, A. R. **Otimização das condições experimentais na desidratação da gipsita para a obtenção de um gesso beta reciclável**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 2006.

MUNHOZ, F. C. **Utilização do gesso para fabricação de artefatos alternativos, no contexto de produção mais limpa**. Dissertação (Mestrado), 154 p. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2008.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. **O GESSO: produção e utilização na construção civil.** Recife: SEBRAE, 2008. 135 p.

SINGH, M. e GARG. M. **Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different Ph.** Scientists Central Building Research Institute, Roorkee, Índia, 1997.

SPINNER, S.; TEFFT, W. E., Proc. A. S. T. M., 1221, 1961.

TANIGUTI, E. **Vedação vertical interna de chapas de gesso acartonado: método construtivo.** São Paulo: EPUSP, 2000.

XIUCHUN, H.; CUIYU, Y.; BAIPING, Y., Action mechanism of water reducter on Portlans cement, J. Chim. Chem. Soc. 14(4), pp. 392-399, 1986.

CAPITULO 2

Aplicação de DCCR na Identificação de Pré-moldados de Alta Resistência Mecânica

RESUMO

Os pré-moldados convencionais de gesso têm como características principais as de um material frágil com baixas resistências à compressão, à flexão e ao impacto. Para melhorar tais características existem trabalhos de moldagem por prensagem associados a uma redução da relação água/gesso. Contudo, em função do caráter altamente comercial dos trabalhos nesta área, pouco se sabe a respeito dessas novas técnicas de produção de pré-moldados de gesso. O objetivo deste trabalho é a determinação de condições operacionais para obtenção de pré-moldados por prensagem. Para isto, utilizou-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para estudar as respostas dos corpos de prova de semi-hidrato e água às variações da carga de prensagem e da relação água/gesso. Os efeitos na microestrutura dos corpos de prova foram acompanhados com observações em um MEV. Os corpos de prova prensados com carga em torno de 280 kN e relação água/gesso de 0,35 apresentaram as melhores propriedades mecânicas. A prensagem provocou um alongamento e arrumação dos cristais em forma de feixes paralelos e uma redução significativa da porosidade do material. A relação água/gesso próxima a 21,0 % (valor estequiométrico) reduz a contribuição da re-hidratação do semi-hidrato no aumento da resistência mecânica final, em função da dificuldade de homogeneização da umidade.

Palavras-chave: DCCR, resistência mecânica, microestrutura, relação água/gesso.

ABSTRACT

The conventional plaster cast and have the main characteristics of a brittle material with low resistance to compression, flexion and impact. To improve these characteristics are pressing molding work associated with a reduction of the water/plaster ratio. However, according to the highly commercial nature of the work in this area, little is known about these new techniques for production of plaster cast. The objective of this study is to determine the operational conditions for obtaining the pre-molded by pressing. For this, was used a central composite rotational design (DCCR) to analyze the surface response of plaster cast produced. The effects on the microstructure of samples were followed up with comments in a SEM. The samples pressed with a load of about 280 kN and water/plaster ratio of 0.35 showed the best mechanical properties. The pressing caused an elongation of the crystals in the form of parallel beams and a significant reduction in the porosity of the material. The water/plaster ratio close to 21.0% (stoichiometric value) reduces the contribution of re-hydration of the semi-hydrate in increased of mechanical strength, depending on the difficulty of homogenizing the moisture.

Keywords: DCCR, mechanical strength, microstructure, water/plaster ratio.

INTRODUÇÃO

A liderança na produção de gesso ostentada pelo Estado de Pernambuco no cenário nacional é, em parte, fruto dos aspectos geológicos e de infra-estrutura. Os fatores geológicos propiciaram uma melhor e mais extensiva preservação das camadas mineralizadas, bem como um capeamento com espessuras mais reduzidas e um grau de pureza suficiente para qualificar esse minério para utilizações das mais nobres (BASTOS; BALTAR, 2003).

O Pólo Gesseiro do Araripe, Sertão de Pernambuco, reúne 312 empresas (21 mineradoras, 61 calcinadoras e 230 fábricas de pré-moldados) 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 (PERES; BANACHOUR; SANTOS, 2008).

Em relação a outras regiões produtoras, a infra-estrutura disponível, sobretudo a existência de uma razoável rede de rodovias, a maioria das quais pavimentadas, e o elevado índice de eletrificação rural, criam vantagens para implantação de unidades mineradoras, calcinadoras e unidades de fabricação de pré-moldados. No entanto, para que o desenvolvimento do Pólo Gesseiro do Araripe não seja prejudicado, há necessidade de que as infra-estruturas de transporte e de energia sejam melhoradas, além da gama de produtos com significativos valores agregados sejam disponibilizados para o mercado (BALTAR; BASTOS; BORGES, 2004). Associe-se a isto, ações voltadas para a preservação do meio ambiente, com desenvolvimentos de tecnologias de reciclagens de gesso (CAVALCANTI, 2006; MONÇÃO JÚNIOR, 2008) e de aproveitamento integral dos resíduos de fabricação e de construção com pré-moldados de gesso.

Os principais tipos de pré-moldados de gesso são as placas, os blocos e os painéis de gesso acartonado, embora também sejam fabricados os denominados

bloquetes ou “tijolos” de gesso. A tecnologia praticada, em linhas gerais, segue um mesmo princípio, variando apenas o grau de sofisticação e automação dos equipamentos empregados (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

O nível de poluição nas empresas menores é bastante elevado; nas de maior porte, acha-se bastante reduzido no interior das unidades fabris, porém falta muito ainda para se reduzir o que é lançado na atmosfera (material particulado) e nas margens das estradas (resíduos da fabricação de pré-moldados), nas circunvizinhanças das fábricas, geralmente localizadas no perímetro urbano dos municípios localizados no pólo do Araripe.

O grande problema técnico com os pré-moldados de gesso é a escala de dureza alcançada pelo gesso ao se re-hidratar, alcançando o valor máximo de 2 (configuração cristalina da microestrutura do minério de gipsita). Dessa forma, tem sido objetivo de alguns trabalhos de desenvolvimento tecnológico a modificação da microestrutura do gesso durante a etapa de sua re-hidratação (FAPESP, 2003; SILVA, 2007), eliminando-se, ao máximo, os espaços vazios deixados pela saída da água de hidratação em excesso.

O presente trabalho tem como objetivo a aplicação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para estudar as condições adequadas de se produzir um pré-moldado de gesso com características de alta resistência mecânica.

MATERIAL E MÉTODOS

Relação Estequiométrica Água/Gesso

Para melhorar o desempenho do gesso, através de modificações de sua microestrutura, a proposta foi preparar corpos de prova com uma quantidade menor possível de água (baixa razão água / pó) de modo a reduzir a porosidade, aumentando a resistência mecânica do corpo de prova. Posteriormente, em razão das dificuldades de preparar uma pasta de gesso que apresente fluidez necessária ao preenchimento adequado de um molde, como se faz convencionalmente, o gesso umedecido com uma quantidade de água próxima à quantidade de água estequiométrica é prensado com uma prensa hidráulica para se obter corpos de prova que possam ser testados em suas propriedades de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e dureza.

Na prática, a quantidade de água utilizada na preparação da pasta convencional de gesso é de 0,7 kg de água para cada kg de gesso. Essa relação cai para um valor mínimo de 0,209, relação que equivale à quantidade estequiométrica, ou seja:

$$r_{\text{água/gesso}} = \frac{1,5 \text{ PM}_{\text{Água}}}{\text{PM}_{\text{Semi hidrato}}} = \frac{1,5 \cdot 18}{129} = 0,209 \frac{\text{kg de água}}{\text{kg de gesso}} \quad (2)$$

Delineamento Composto Central Rotacional

A escolha de um planejamento fatorial adequado é função direta do número de fatores a serem estudados, da disponibilidade de matéria-prima, do número de ensaios que têm viabilidade de serem realizados e do custo desses ensaios (RODRIGUES; IEMMA, 2005). Contudo existe um número mínimo de experimentos a serem realizado para que a discussão dos resultados e a interpretação estatística não fiquem comprometidas. No caso de 2 (presente estudo) ou 3 variáveis

independentes recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR). Para 4 fatores pode-se fazer opção por um DCCR ou inicialmente um planejamento fracionário do tipo 2^{4-1} , como uma investigação inicial em relação aos efeitos das variáveis independentes estudadas sobre as respostas desejadas. Cinco fatores resultam em um número elevado de ensaios (65 + 10 pontos axiais + 3 repetições no ponto central). Neste caso, o processo ainda está longe das condições otimizadas, não compensando investir diretamente num planejamento fatorial completo.

O ajuste das respostas experimentais a um modelo de segunda ordem, o qual tem a forma:

$$y = \beta_0 + \sum_j \beta_j \cdot x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_j \beta_{jj} x_j^2 + e \quad (3)$$

é uma das vantagens do uso de um DCCR. Em geral, num DCCR com dois níveis originais, tem-se 2^K pontos fatoriais + $2 \cdot K$ pontos axiais + um número arbitrário de pontos centrais.

Há várias possibilidades para a escolha dos níveis nos pontos axiais. Neste trabalho foram utilizados pontos axiais do tipo $\pm \alpha$ (RODRIGUES; IEMMA, 2005), em que:

$$\alpha = \left(\frac{K}{N} \right)^{1/4} \quad (4)$$

Alguns valores para α são mostrados no Quadro a seguir. O valor de cada variável codificada pode ser estimado de acordo com a Equação (4):

$$c_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{\sigma}} \quad (5)$$

Em que:

c_i - valor codificado da variável independente no nível i

x_i - valor médio da variável independente no nível i

\bar{x} - valor médio da variável independente no ponto central

δ - espaçamento entre as variáveis independentes

Quadro 2.1 – Alguns valores de α para diferentes valores de K

K	2	3	4	5	6
α	$\pm 1,4142$	$\pm 1,6818$	$\pm 2,0000$	$\pm 2,3784$	$\pm 2,8284$

No caso das condições experimentais deste trabalho, utilizou-se um delineamento composto central rotacional para as duas variáveis – carga de prensagem e relação água gesso. O Quadro 2.2 apresenta os valores dos fatores correspondente aos valores desses mesmos fatores codificados.

Quadro 2.2 – Valores das variáveis para o DCCR adotado

Fatores\Níveis	-1,41	-1	0	1	1,41
Carga de prensagem, kN	238	250	280	310	322
kg água/kg gesso, -	0,21	0,25	0,35	0,45	0,49

Com a adoção do delineamento do tipo DCCR para as duas variáveis independentes o número de experimentos foi estimado em 12, assim distribuídos: 4 pontos fatoriais, 4 pontos centrais e 4 pontos axiais.

Semi-hidrato Utilizado

O semi-hidrato utilizado nos experimentos foi produzido em trabalhos anteriores conforme (CAVALCANTI, 2006). A água de hidratação, da ordem de 5,89 %, foi determinada com auxílio de um analisador de umidade por infra-vermelho,

modelo IV2002 com impressora, de marca GEHAKA. Para observar a microestrutura do semi-hidrato produzido foram preparadas amostras e observadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV: JSM 5600 LV JEOL) pertencente à Universidade Católica de Pernambuco. As amostras do gesso não foram submetidas a tratamentos especiais como o de metalização, para serem observadas ao MEV e foram fixadas ao suporte do microscópio apenas por uma cola de carbono.

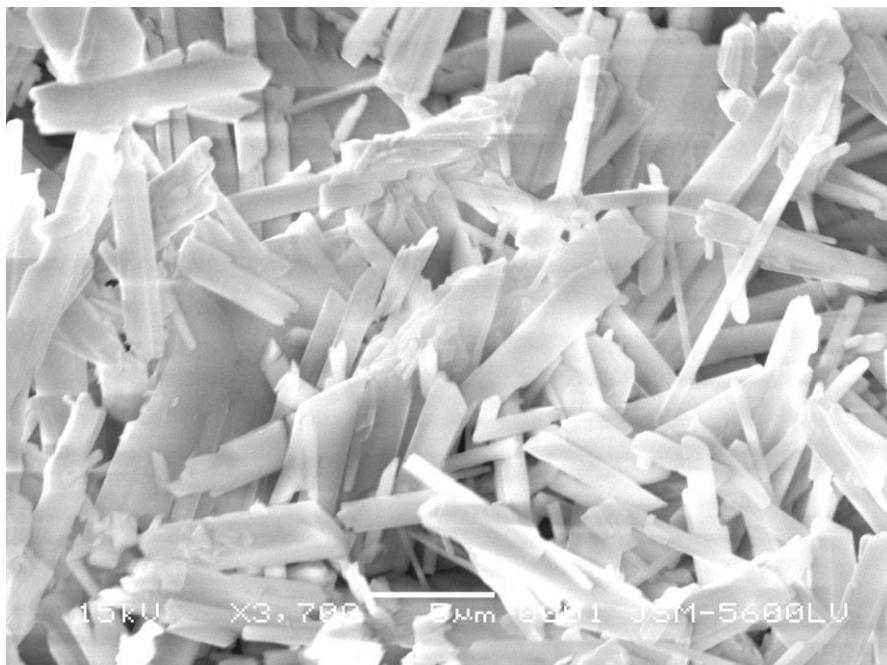
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz do delineamento experimental aplicado, com as respostas obtidas de resistências à compressão e à flexão, encontra-se na Tabela 1.

Tabela 2.1 – Matriz de planejamento resultante da aplicação de um DCCR aos dados experimentais para um tempo de secagem de 24 horas

Experimento	Carga de prensagem (kN)	Relação água/gesso kg/kg	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração na flexão (MPa)
1	-1	-1	8,5	4,51
2	+1	-1	12,4	4,82
3	-1	+1	16,6	5,32
4	+1	+1	18,0	5,49
5	0	0	26,5	7,80
6	0	0	26,8	7,74
7	0	0	26,4	7,78
8	0	0	26,5	7,79
9	-1,41	0	14,4	4,88
10	1,41	0	29,3	9,22
11	0	-1,41	15,2	5,11
12	0	1,41	20,1	6,33

Para observar as variações sofridas pela microestrutura dos corpos de prova foras levadas ao MEV amostras hidratadas do semi-hidrato utilizado moldadas com auxílio da formação de uma pasta (70 % de água em peso em relação ao gesso) e com auxílio de prensagem. A Figura 2.1 ilustra a microestrutura do gesso hidratado, caracterizada por cristais longos do processo de fabricação sob controle de pressão e temperatura, porém apresenta significativo espaçamento entre cristais o que caracteriza considerável porosidade do material.

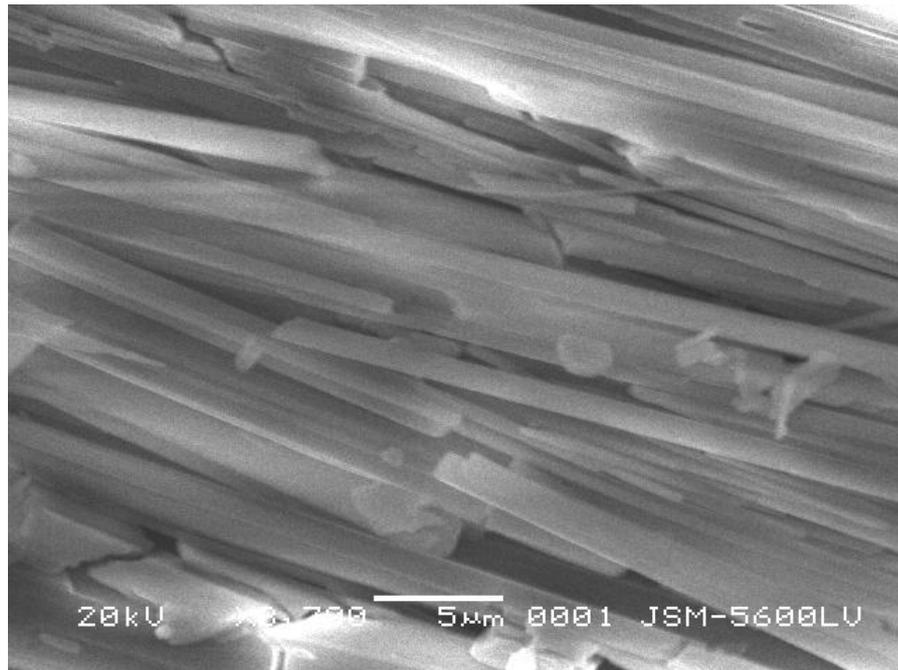


Escala (x-3700)

Figura 2.1 – Micrografia dos cristais do gesso hidratado utilizado nos experimentos

e observados com auxílio do MEV

A Figura 2.2 ilustra a microestrutura de uma amostra de gesso hidratado, prensada e observada ao MEV com fator de ampliação semelhante à micrografia mostrada pela Figura 1 (3700 vezes). Neste caso pode-se observar cristais muito mais alongados e conformados em forma de feixes, reduzindo os espaços entre cristais, configurando um material com baixíssima porosidade.



Escala (x-3700)

Figura 2.2 – Micrografia dos cristais dos corpos de prova produzidos por prensagem e observados com auxílio do MEV.

Com auxílio do software STATISTICA, Versão 7, foram obtidos dados da análise do delineamento experimental proposto (DCCR). As Figuras de 2.3 a 2.6 são relativas às variações da resistência à compressão sofridas pelos corpos de prova. A Tabela 2.2 apresenta os dados relativos a análise de variância, ajustando um modelo estatístico aos dados experimentais pela validação da seguinte expressão:

Tabela 2.2 - Dados fornecidos pela ANOVA para a resistência à compressão dos corpos de prova obtidos por prensagem do gesso

FATOR	SOMA QUADRÁDITA	GRAU DE LIBERDADE	MÉDIA QUADRÁTICA	F	P
Carga (L)	86,9339	1	86,9339	63,7657	0,004098
Carga (Q)	105,9502	1	105,9502	77,7141	0,003076
A/G (L)	53,1978	1	53,1978	39,0204	0,008277
A/G (Q)	243,5422	1	243,5422	178,6373	0,000905
1L by 2L	1,5625	1	1,5625	1,1461	0,362844
Lack of Fit	105,8546	3	35,2849	25,8813	0,012044
Erro Puro	4,0900	3	1,3633	-	-
TOTAL	548,7625	11	-	-	-

Tabela 2.3 - Coeficientes de regressão para o modelo estatístico de resistência à compressão dos corpos de prova obtidos por prensagem do gesso

FATOR	COEF. DE REGR.	ERRO PURO	T (3)	p	LIM. DE CONF -95%	LIM. DE CONF +95%
Mean/Interc	27,05000	0,583809	46,3336	0,000022	25,19206	28,90794
Carga (L)	3,29647	0,412816	7,9853	0,004098	1,98271	4,61024
Carga (Q)	-4,06875	0,461542	-8,8156	0,003076	-5,53758	-2,59992
A/G (L)	2,57871	0,412816	6,2466	0,008277	-1,26494	3,89247
A/G(Q)	-6,16875	0,461542	-13,3655	0,000905	-7,63758	4,69992
1L by 2L	-0,62500	0,583809	-1,0706	0,362844	-2,48294	1,23294

A Tabela 2.3 fornece os coeficientes de correlação utilizados na composição da Equação 5 para um intervalo de confiança de 95 %. Os dados em vermelho indica a obediência a um limite de confiança menor que 5 % e um valor da constante de Fisher calculado menor que o valor tabelado.

$$RC = 27,05 + 3,29647 \cdot [F] - 4,06875 \cdot [F]^2 + 2,57871 \cdot [A/C] - 6,16875 \cdot [A/C]^2 \quad (5)$$

A superfície de resposta para a resistência à compressão dos corpos de prova, obtida com o modelo estatístico da Equação 5 é mostrada pela Figura 2.3, auxiliando a definir as condições operacionais adequadas. A Figura 2.4, apresentando as curvas de nível, ou a projeção horizontal da superfície obtida pela Figura 2.3, mostra também haver pouca interação entre os fatores água/gesso e a carga de prensagem utilizada devido as curvas existirem um simetria entre si.

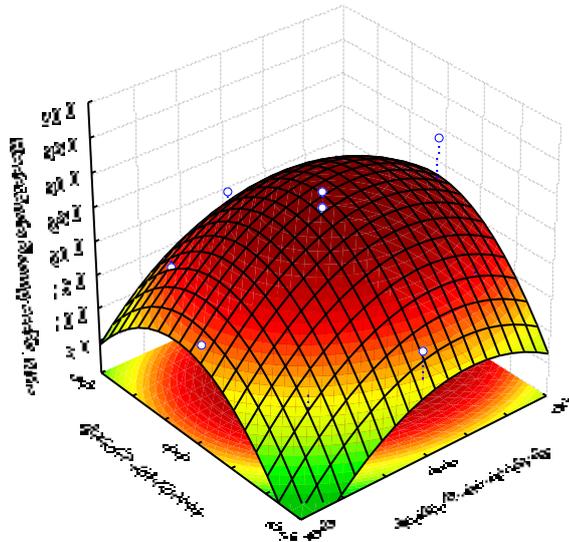


Figura 2.3 – Comportamento da resistência à compressão para os corpos de prova obtidos por prensagem

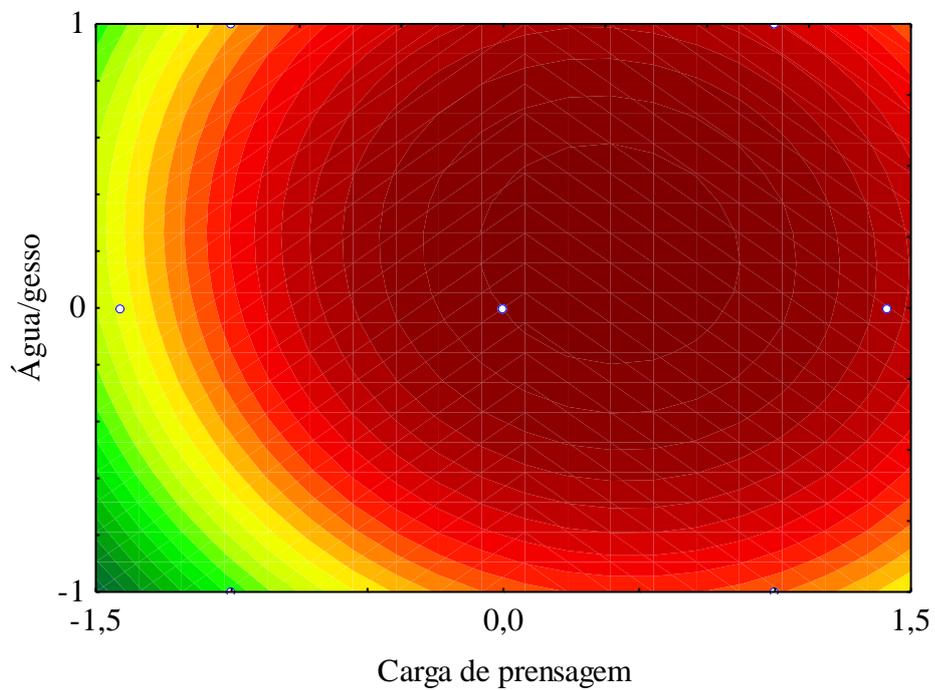


Figura 2.4 - Curvas de nível para a resistência à compressão dos corpos de prova

Um diagrama de Pareto foi obtido para os dados de resistência à compressão e os termos referentes AA equação 5 foram confirmados como fazendo parte do modelo obtido.

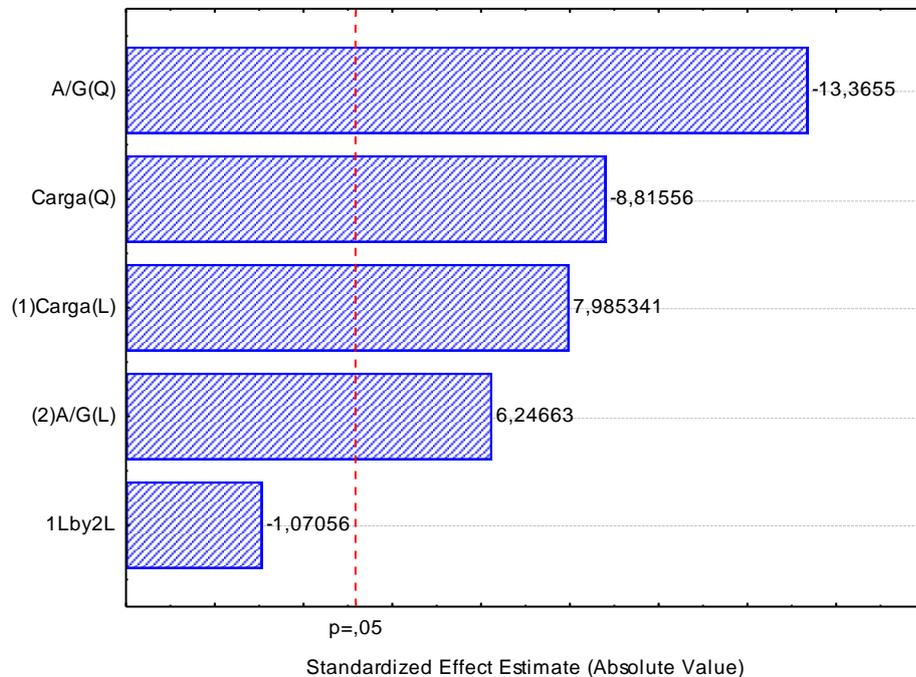


Figura 2.5 – Diagrama de Pareto para o modelo estatístico de resistência à compressão dos corpos de prova

A Figura 2.6 mostra que os pontos experimentais encontram-se homogeneamente distribuídos em torno do gráfico traçado com auxílio do modelo de simulação. O ajuste da Equação 5 aos pontos experimentais forneceu um coeficiente de correção de aproximadamente 0,9 (0,89423).

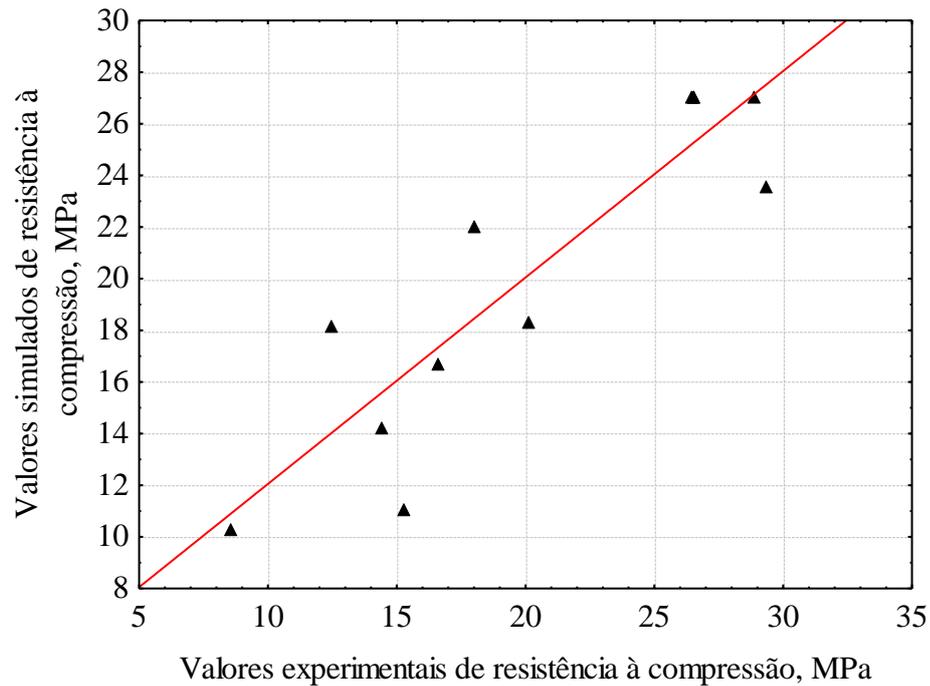


Figura 2.6 – Comparação entre valores simulados e experimentais do modelo estatístico para a resistência à compressão

Novamente os índices de 5 % para o limite de confiança e 95 % para o intervalo de confiança foram adotados.

Tabela 2.4 - Dados fornecidos pela ANOVA para a resistência à flexão dos corpos de prova obtidos por prensagem do gesso

FATOR	SOMA QUADRÁDITA	GRAU DE LIBERDADE	MÉDIA QUADRÁTICA	F	P
Carga (L)	5,47422	1	5,47422	7914,54	0,000003
Carga (Q)	3,14721	1	3,14721	4550,18	0,000007
A/G (L)	1,28428	1	1,28428	1856,78	0,000028
A/G (Q)	11,94649	1	11,94649	17272,03	0,000001
1L by 2L	0,00490	1	0,00490	7,08	0,076232
Lack of Fit	7,65370	3	2,55123	3688,53	0,000008
Erro Puro	0,00207	3	0,00069	-	-
TOTAL	27,58689	11	-	-	-

Tabela 2.5 - Coeficientes de regressão para o modelo estatístico de resistência

à Flexão dos corpos de prova obtidos por prensagem do gesso

FATOR	COEF. DE REGR.	ERRO PURO	T (3)	p	LIM. DE CONF -95%	LIM. DE CONF +95%
Mean/Interc	7,77750	0,013150	591,455	0,000000	7,73565	7,81935
Carga (L)	0,82721	0,009298	88,964	0,000003	0,79762	0,85680
Carga (Q)	-0,70125	0,010396	-67,455	0,000007	-0,73433	-0,66817
A/G (L)	0,40067	0,009298	43,090	0,000028	0,37108	0,43026
A/G(Q)	-136625	0,010396	-131,423	0,000001	-1,39933	-1,33317
1L by 2L	-0,03500	0,013150	-2,662	0,076232	0,07685	0,00685

As Tabelas 2.4 e 2.5 e as Figuras de 2.7 a 2.10 são relativas ao comportamento da resistência à tração na flexão. A Tabela 4 apresenta os termos validados pela anova para o modelo sobre a resistência à flexão. A Tabela 2.5 forneceu os coeficiente de correlação na obtenção do modelo da Equação 6:

$$RF = 7,7775 + 0,82721 \cdot [F] - 0,70125 \cdot [F]^2 + 0,40067 \cdot [A/G] - 1,36625 \cdot [A/G]^2 \quad (6)$$

A superfície de resposta da resistência à tração na flexão, em função da relação água/gesso e da carga de prensagem, é mostrada pela Figura 2.7. Também neste gráfico ficou definida uma região de parâmetros operacionais adequados à obtenção de um pré-moldado com bem mais alta resistência mecânica que os pré-moldados de gesso tradicionais. A Figura 2.8 mostra através das curvas de níveis que, para a resistência à tração na flexão, os fatores do delineamento experimental possuem maior interação que no caso da resistência à compressão.

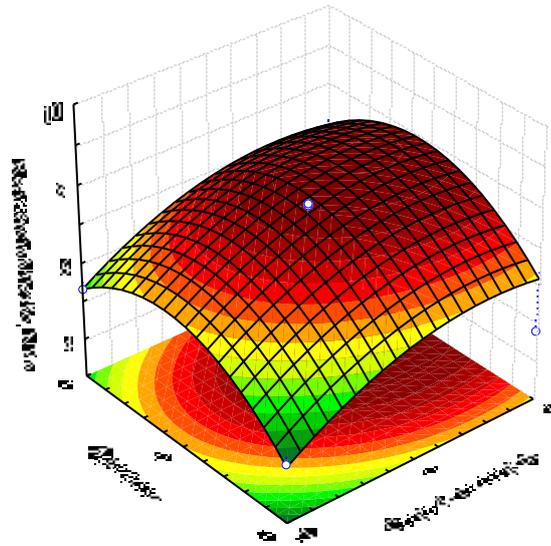


Figura 2.7 – Comportamento da resistência à Flexão para os corpos de prova de gesso obtidos por prensagem

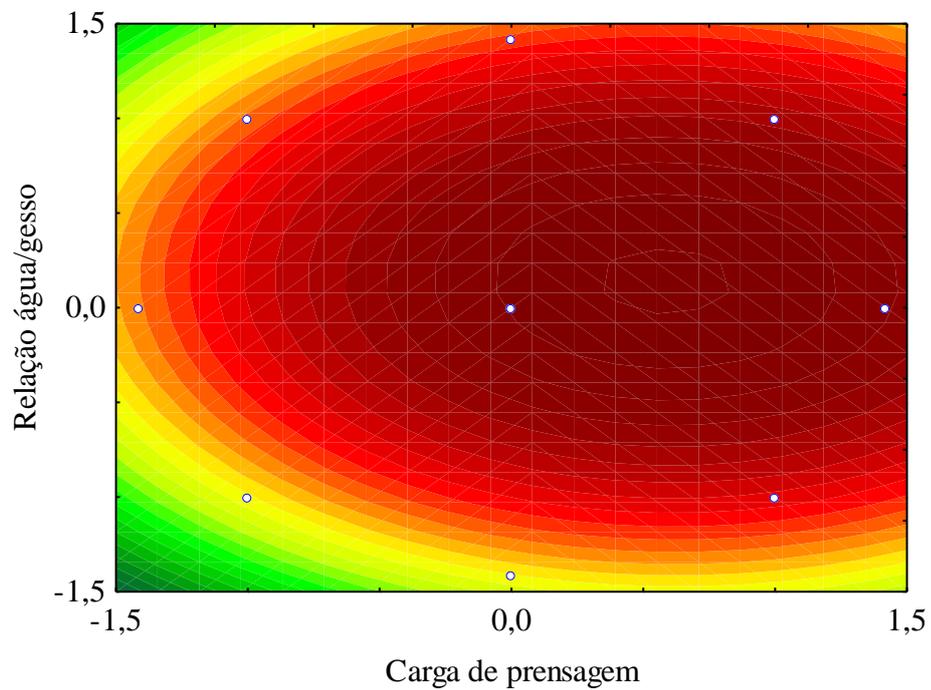


Figura 2.8 - Curvas de nível para a resistência à flexão dos corpos de prova

A Figura 2.9 apresenta um diagrama de Pareto que confirma, ou valida o modelo da equação 6 para a resistência à Flexão. A Figura 2.10 compara os dados simulados e

experimentais relativos à Flexão. Neste caso pode-se perceber que o ajuste deste modelo é um pouco menor que para o modelo da resistência à compressão.

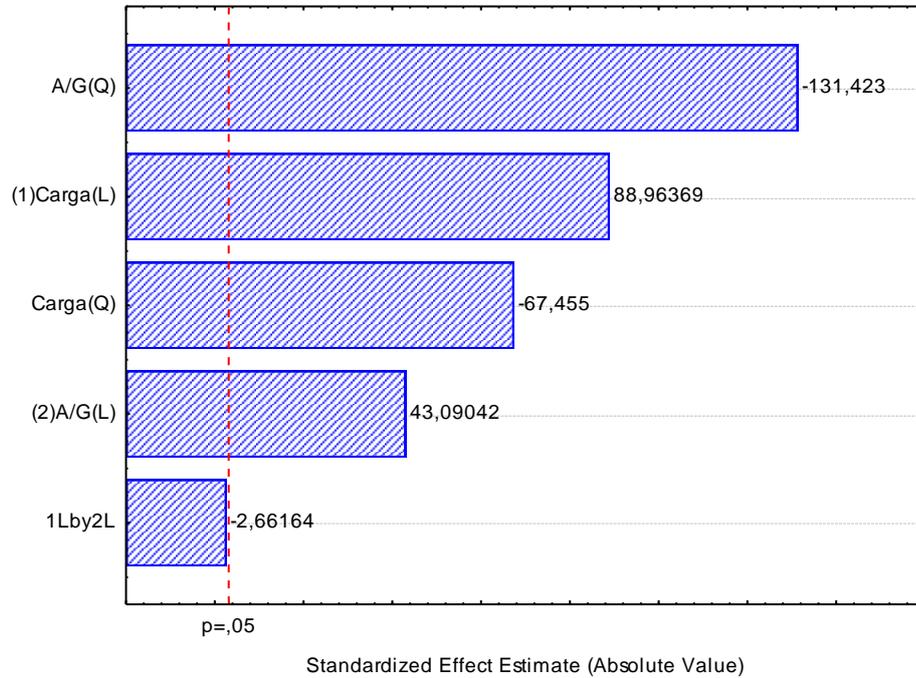


Figura 2.9 – Diagrama de Pareto para o modelo estatístico de resistência à flexão

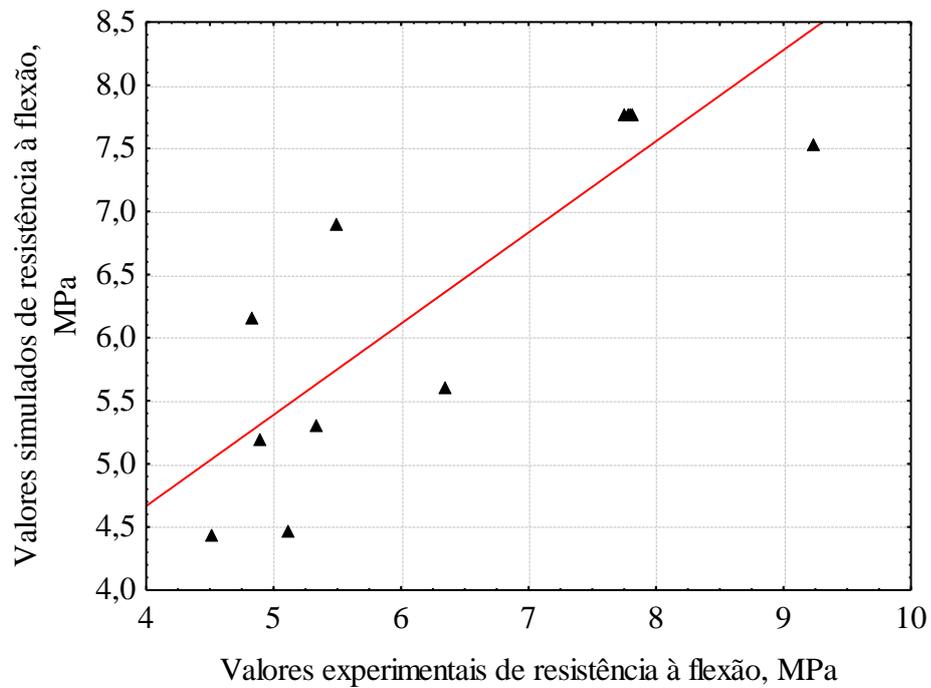


Figura 2.10 – Comparação entre valores simulados e experimentais do modelo estatístico para a resistência à compressão

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Um delineamento do tipo DCCR foi aplicado à produção de gesso de alta resistência mecânica e auxiliou a identificar importantes parâmetros operacionais como base de definição para se chegar à condição de otimização do processo.

O nível de carga médio utilizado foi suficiente para produzir um pré-moldado de gesso com resistências mecânicas (compressão e flexão) de valores semelhantes a de um pré-moldado de concreto. Foi observado que uma redução da relação água/gesso até o nível estequiométrico dificulta a ocorrência da hidratação dos cristais de gesso. Sem a ligação química de hidratação, neste ponto do corpo de prova apenas o empacotamento conseguido na prensagem fica responsável pela resistência do corpo de prova. Isto provavelmente está relacionado à dificuldade de homogeneização da mistura água-gesso.

Uma maior carga de pressão que aquela indicativa das melhores condições operacionais parece entrar na região de saturação do processo de moldagem por prensagem. Chega-se, neste caso, a um limite de adensamento repercutindo em valores limites de propriedades dos pré-moldados de gesso.

Como sugestão para novos trabalhos propõe-se a incorporação de novos materiais ao pré-moldado, para estudar formas de obtenção de um ganho de resistência à tração na flexão, o que deve dar ao material um aumento na sua faixa de aplicação na construção civil.

REFERÊNCIAS

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F.; BORGES, L. E. P. Variedades Mineralógicas e Processos Utilizados na Produção dos Diferentes Tipos de Gesso. In.: Encontro nacional de tratamento de minérios e metalurgia extrativa. **Anais**: Florianópolis, 2004. p.329, 769 - 776.

BASTOS, F. F.; BALTAR, C. A. M. Avaliação dos processos de calcinação para produção de gesso Beta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, XVIII. **Anais**... Minas Gerais: 2003. p. 179-185.

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.

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-FAPESP (BR/SP). Milton Ferreira de Souza. Gesso e compósitos de alta resistência mecânica e baixa permeabilidade e seu processo de fabricação. BR, PI0303814-9, 09/09/2003. Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas. Minerais não metálicos. Disponível em: <http://sbrtv1.ibict.br/upload/sbrt584.pdf?PHPSESSID=5bb1f470a149e3a6595439e7301587ae> Acesso em: 19 de dezembro de 2008.

MONÇÃO JÚNIOR, A. R. **Otimização das condições experimentais na desidratação da gipsita para a obtenção de um gesso beta reciclável**. 2008. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, Pernambuco. 2006.

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. **O GESSO**: produção e utilização na construção civil. Recife: SEBRAE, 2008. 121 p.

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

SILVA, F. C. P. R. **Estudo teórico-experimental preliminar de um processo de produção de premoldado de gesso de alta resistência mecânica**. Monografia, 50 p. Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Católica de Pernambuco, 2007.