



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

Thaisa de Carvalho Avelar

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS
DE GESSO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DE
GESSO DE BAIXO DESEMPENHO MECÂNICO**

Recife

2012

Thaisa de Carvalho Avelar

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE
GESSO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DE GESSO DE
BAIXO DESEMPENHO MECÂNICO**

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

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Informática, Modelagem e Controle de Processos

Orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Co-orientador: Prof. Dr. José Edson Gomes de Souza

Co-orientadora: Profa. Dra. Eliane Cardoso de Vasconcelos

Recife

2012

A948o

Avelar, Thaisa de Carvalho

Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico / Thaisa de Carvalho Avelar ; orientador Valdemir Alexandre dos Santos ; co-orientadores José Edson Gomes de Souza, Eliane Cardoso de Vasconcelos, 2012.

87 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2012.

1. Gipsita. 2. Resistência de materiais. 3. Gesso em pré-moldado. 4. Resíduos sólidos I. Título.

CDU 666.913

Avelar, T. C. Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir de Gesso de Baixo Desempenho Mecânico.

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE PRÉ-MOLDADOS DE GESSO DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DE GESSO DE BAIXO DESEMPENHO MECÂNICO

THAISA DE CARVALHO AVELAR

Examinadores:

Prof. Dr Valdemir Alexandre dos Santos
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Prof Dr Sérgio Murilo Fernandes
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Prof Dr. Carlos Costa Dantas
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

“O seu tempo é limitado, então não o gaste vivendo a vida de um outro alguém. Não fique preso pelos dogmas, que é viver com os resultados da vida de outras pessoas. Não deixe que o barulho da opinião dos outros cale a sua própria voz interior. E o mais importante: tenha coragem de seguir o seu próprio coração e a sua intuição. Eles de alguma maneira já sabem o que você realmente quer se tornar. Todo o resto é secundário.”

(Steve Jobs)

“Não se pode ensinar tudo a alguém, pode-se apenas ajudá-lo a encontrar por si mesmo.”

(Galileu Galilei)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter movimentado as forças do universo para tornar o meu sonho em realidade, pois acredito que nada acontece por acaso.

Aos meus pais, Jô e Wilson, por me incentivar e apoiar a minha escolha, por estarem sempre presente em minha vida, por compreenderem minha ausência, principalmente nesta etapa final do Mestrado. Eu amo vocês dois.

Ao Prof, Valdemir por me escolher para ser sua orientanda neste projeto, por todo o incentivo para dar continuidade a este projeto, que a cada dia me surpreendia pela complexidade deste assunto. Por toda sua paciência em me orientar, pelos conhecimentos técnicos transmitidos, pela amizade e compreensão. Hoje tenho certeza que fiz a escolha certa e espero no futuro poder fazer um Doutorado com você me orientando.

Agradeço a todo o apoio recebido do meu namorado Claudio, pela sua paciência e compreensão, foi sem dúvida uma das pessoas fundamentais nesta etapa de minha vida.

Agradeço ao meu Co-orientador Edson pela sua dedicação em me orientar quando o Prof. Valdemir adoeceu.

A Profa. Eliane, por ter aceitado a ser minha co-orientadora, por ter me incentivado continuar a pesquisar.

Pelo apoio dos meus novos amigos (Cristina, Francisco, Paula, Lucia Paula, Rita, Rivaldo e Antonio) e de minha amiga Mirella.

Aos professores que me apoiaram durante todo o Mestrado (Galba, Alexandra, Carlos, Sérgio, Roziana e Elaine).

A Universidade Católica de Pernambuco, pelos espaços cedidos para execução do Mestrado.

E por fim, agradeço aos profissionais do Centro de Pesquisa do Gesso em Araripina por ter executado os experimentos.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I	
1.1 Introdução	14
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3. Revisão da Literatura	18
1.3.1 História do Gesso	18
1.3.2. O Gesso e suas características mecânicas	21
1.3.3. Aditivação de gessos	27
1.3.4. Incorporações de fibras naturais ou sintéticas	34
1.3.5. Microestrutura do gesso	36
1.3.6. Prensagem de Sólidos	40
1.3.7. Influência da relação água/gesso e prensagem de pré-moldados	45
1.3.8. Normas para caracterização do gesso	47
1.3.9. Escolha do Tipo de Planejamento Experimental	52
1.3.10. Considerações sobre a bibliografia	55
1.4 Referências Bibliográficas	56
CAPÍTULO II – Otimização da Obtenção de pré moldados de Gesso por Prensagem	
Resumo	61
Abstract	62
2.1 INTRODUÇÃO	63
2.2 Material e Métodos	64
2.2.1 Planejamento dos Experimentos	64

Avelar, T. C. Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir de Gesso de Baixo Desempenho Mecânico.

2.2.2 Confecção dos Corpos de Prova	65
2.2.3. Análise dos dados	67
2.2.4 Microscópio de Varredura	70
2.3 Resultados e Discussões	71
2.3.1 Análise das superfícies de resposta	71
2.3.2 Determinação de condições operacionais otimizadas	72
2.4 Conclusões e Sugestões	83
2.5 Referências	84
APÊNDECE	
Apêndice A	86

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 - Fluxograma do processo de produção do gesso – Sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)	22
Figura 1.2 – Exemplo de curva de calor de hidratação de uma pasta de gesso	28
Figura 1.3 – Célula cristalina do mineral gipsita	36
Figura 1.4 – Cristais do Gesso Beta: cristais pequenos (menores que $10\mu\text{m}$), mal formados e porosos	39
Figura 1.5 – Cristais do Gesso Alfa: cristais grandes (em torno de $20\mu\text{m}$), bem formados e sem poros	39
Figura 1.6 – Formação do Cristal de di-hidratado	39
Figura 1.7 – Diferentes formas de adensamento por prensagem	41
Figura 1.8 – Distribuição de pressões numa prensa	42
Figura 1.9 – Processo de Conformação pelo EDD	44
Figura 1.10 – Processo de Conformação pelo Método UCOS	45

CAPÍTULO II

Figura 2.1 - Forma prensagem de corpo de provas:(a) base; (b) câmara e tampa e; (c) estais nas extremidades e centros da parede	66
Figura 2.2 - Máquina universal marca EMIC modelo DL 10000 instalada no CT-Araripe	67
Figura 2.3 - Esquema com componentes para o cálculo da resistência à compressão mecânica	68
Figura 2.4 - Esquema com geometria utilizada no cálculo da resistência à tração na flexão	69
Figura 2.5 – Microscopia eletrônica de varredura da Universidade Católica de Pernambuco	70
Figura 2.6 - Diagrama de Pareto para a resistência à compressão	73
Figura 2.7 - Resistência à compressão em função da pressão de conformação e da relação gesso/água	74
Figura 2.8 - Curvas de nível para a resistência à compressão	74
Figura 2.9 – Diagrama de Pareto para resistência a flexão	76
Figura 2.10 - Resistência à flexão em função da pressão de conformação e da relação gesso/água	77
Figura 2.11 - Curvas de nível para a resistência à flexão	77
Figura 2.12 – Diagrama de Pareto para a Absorção de Água	79
Figura 2.13 – Absorção da Água em função da pressão de conformação e da relação gesso/água	80

Avelar, T. C. Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir de Gesso de Baixo Desempenho Mecânico.

Figura 2.14 - Curvas de nível para a Absorção de Água	80
Figura 2.15 – Micrografia dos cristais do gesso hidratado utilizado nos experimentos e observados com auxílio do MEV	81
Figura 2.16 – Micrografia dos cristais dos corpos de prova produzidos por prensagem e observados com auxílio do MEV.	82

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 – Principais usos de gipsita e do gesso	19
Tabela 1.2 – Outros usos de gipsita e do gesso	20
Tabela 1.3 – Tipos de Gipsitas encontradas na Região do Araripe	23
Tabela 1.4 – Composição química média para os depósitos de gipsita do Araripe	23
Tabela 1.5 – Composição química teórica do mineral gipsita	25
Tabela 1.6 – Propriedades físicas do mineral gipsita	25
Tabela 1.7 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento	37
Tabela 1.8 – Exigências químicas do gesso para construção civil	48
Tabela 1.9 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil	48
Tabela 1.10 - Exigências físicas do gesso para construção civil	48
Tabela 1.11 – Matriz de planejamento experimental fatorial 2 ³	54

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 - Variáveis reais e codificadas utilizadas no DCCR adotado	64
Tabela 2.2 – Matriz de planejamento e respostas resultantes da aplicação do DCCR	71
Tabela 2.3 - ANOVA para a resistência à compressão	72
Tabela 2.4 - ANOVA para a resistência à flexão	75
Tabela 2.5 - ANOVA para a resistência à absorção de água	78

RESUMO

A obtenção de estruturas pré-moldadas de gesso apresentando resistências mecânicas consideráveis em relação aos pré-moldados convencionais tem sido obtidas com auxílio de aditivos, mais especificamente a adição de fibras sintéticas ou naturais, à pasta de gesso. Recentes trabalhos têm utilizado a prensagem como forma de dar ao pré-moldado de gesso características mecânicas bem superiores à aditivação por incorporação de fibras. Por se tratar de assunto de grande interesse comercial, a revelação das formas mais recentes de aditivação por prensagem não revelam tais parâmetros operacionais. O presente trabalho revisa a literatura sobre o assunto e define estratégias para a otimização das condições ótimas de produção desse tipo de pré-moldado. Os experimentos foram orientados por um delineamento composto central rotacional (DCCR) e analisado com auxílio da metodologia de superfície de resposta (MSR). A redução da água de empastamento e a compressão da pasta de gesso, de baixo desempenho mecânico, por prensagem, conferiram à microestrutura do pré-moldado características mecânicas especiais. Quando comparados com diferentes tipos de aditivação os resultados mostraram a validade do tipo de manuseio proposta para a confecção de pré-moldados.

Palavras-Chave: Gipsita; Rejeito Sólido; Alta resistência mecânica; MRS.

Avelar, T. C. Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir de Gesso de Baixo Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

Obtaining structures precast gypsum having substantial mechanical resistance compared to conventional pre-molded has been obtained with the aid of additives, more specifically the addition of synthetic fibers or natural gypsum to the slurry. Recent studies have used as a way of pressing the pre-molded gypsum mechanical characteristics far superior to the additive by incorporation of fibers. Because it is matter of great commercial interest, the revelation of the newer forms to additive by pressing doesn't reveal such operational parameters. This paper reviews the literature on the subject and sets strategies for the optimization of the terms conditions for producing this type of precast. The experiments were guided by a central composite rotational design (CCRD) and analyzed with the aid of response surface methodology (RSM). The reduction of the water pasting and folder compression gypsum of poor mechanical properties by pressing conferred the pre-molded microstructure of special mechanical characteristics. When compared with different types of additives results showed the validity of the type of handling proposed for making precast.

Key Words: Gypsum, Solid waste, High mechanical strength, SRM.

Avelar, T. C. Otimização da Produção de Pré-Moldados de Gesso de Alta Resistência a Partir de Gesso de Baixo Desempenho Mecânico.

CAPÍTULO I

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, em pó, o qual é convertido em semi-hidrato de sulfato de cálcio 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 (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

O minério gipsita é transformado em gesso com auxílio de grandes fornos, podendo estes serem 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 apud 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, os maiores produtores mundiais de gipsita são: Estados Unidos da América (15,9%), Irã (10,0%), Canadá (8,6%), Tailândia (7,3%), Espanha (6,8%) e China (6,8%). O Brasil possui a maior reserva mundial (1,2 bilhão de toneladas), mas só contribui com 1,4% da produção mundial (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2006 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008).

O Estado de Pernambuco, que possui reservas abundantes de gipsita na região do Sertão do Araripe, envolvendo os Municípios de Araripina, Bodocó, Ipubi, Ouricuri e Trindade, é responsável por 89,4% da produção de gipsita e por 81% da produção brasileira de gesso (LYRA SOBRINHO *et al.*, 2006 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008). As jazidas do Araripe

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

são consideradas as de minério de melhor qualidade no mundo e apresentam excelentes condições de mineração (relação estéril/minério e geomorfologia da jazida). 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, enquanto 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, 2006).

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, utilizando gesso de baixo desempenho. 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 a ser enviado para publicação em periódico da área, a metodologia

utilizada, define condições operacionais otimizadas 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, que é tóxico e inflamável (MUNHOZ, 2008). Dessa forma, uma das grandes vantagens da metodologia de produção desse tipo de pré-moldados é de que, mesmo aqueles gessos que são produzidos em condições pouco adequadas (CAVALCANTI, 2006 apud MONÇÃO JR, 2008), podem ser aproveitados e, 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

Definir condições otimizadas para obtenção de um pré-moldado de gesso, com alta resistência mecânica, a partir de gesso de baixo desempenho mecânico e com consequente valorização do gesso como material de construção. Essa tecnologia visa, ainda, beneficiar a preservação ambiental na área gesseira.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Produzir pré-moldados à base de gesso de baixo desempenho mecânico e água, pela redução do teor de água de empastamento e aplicação de prensagem como forma de reduzir a porosidade da peça.
- Realizar testes através do Planejamento dos Experimentos das condições de trabalho para definir condições otimizadas de produção de pré-moldado de gesso.
- Determinar as características mecânicas do pré-moldado produzido, comparando com as propriedades mecânicas do produto final com as do gesso original e de outros materiais produzidos por aditivação via incorporação de fibras.

1.3. REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1. História do Gesso

A arqueologia evidenciou que a humanidade já utiliza este material há milhares de anos, conforme descrito por Peres, Benachour e Santos (2008), a qual foi encontrado nas ruínas da Síria e da Turquia construídas no 8º milênio a.C., utilizado como suporte em afresco decorativos. Nas ruínas da cidade de Jericó, no 6º milênio a.C., o gesso foi utilizado em modelagens. Assim como, este material foi utilizado na construção da pirâmide de Quéops, localizado no Egito, no ano de 2.800 antes da nossa era.

Segundo os mesmos autores o filósofo Theophraste, que viveu entre o IV e III século antes de Jesus Cristo, tornou-se conhecido por seu “Tratado da Pedra”, que é o mais antigo documento dos autores que se interessaram pelo Gesso. Neste documento é citado a existência de gesseiras em Chipre, na Fenícia e na Síria, e indicava que o gesso era utilizado, como argamassa, para a ornamentação, nos afrescos, nos baixo relevos e na confecção de estátuas.

A partir da invasão romana, o processo de construção, utilizando o gesso, difundiu pela França e Península Ibérica e iniciou-se o conhecimento dos processos construtivos chamados de pedreiros de gesso. O modelo de construção era baseado no aproveitamento das construções em madeira revestindo-as com gesso, sendo utilizado até épocas Carolígeas e Merovíngias (Século V a VIII). Nessa mesma época, o gesso foi utilizado na região parisiense para a fabricação de sarcófagos decorados (KANNO, 2009).

Após o século X d.C, principalmente na França, o gesso voltou a ser utilizado como material de construção. Várias edificações parisienses desta época utilizavam o gesso como material de construção, além de possuir grandes depósitos de gipsita nos arredores de Paris. Esses fatos permitiram cunhar a expressão que até hoje se mantém como sinônimo do gesso em inglês “Plaster of Paris” (KANNO, 2009).

Segundo o mesmo autor, na época da cultura gótica, o gesso reafirmou seu papel como um importante material de construção, presentes nas argamassas de assentamento dos tijolos em habitações da Baixa Saxônia, atual Alemanha. Durante o período Renascentista, encontramos o gesso na decoração e, durante o Barroco, houve um uso abundante do estoque (um tipo de reboco).

Após a destruição de Londres (1666), ocasionada por um grande incêndio, o rei da França (Luiz XIV) promulgou uma lei em 1667 ordenando que as construções (na maioria em madeira) fossem revestidas com gesso para proteger as construções da França, o que mais tarde daria à Paris o título de “Capital do Gesso” (KANNO, 2009).

Segundo o mesmo autor, a partir do século XVIII, os trabalhos de Lavoisier (1768 e 1775), de Van't Hoff e de Le Chatelier (1887) permitiram uma abordagem científica sobre a desidratação da gipsita. À luz da ciência e das novas tecnologias advindas da Revolução Industrial, a produção de gesso atingiu grandes volumes.

Atualmente, o gesso tem sua maior aplicação na construção civil, sendo também utilizado em outros segmentos, conforme apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais usos de gipsita e do gesso

Segmentos	Descrição
Construção Civil	Utiliza produtos pré-fabricados para a construção civil – pranchas, blocos e placas, gesso acartonado e chapas de fibra prensada para paredes, e para revestimento de alvenarias convencionais, além da fabricação de cimento.
Agricultura	Utiliza a gipsita moída, conhecida como gesso agrícola, para neutralizar os solos alcalinos e salinos e, melhorar a permeabilidade dos solos argilosos, contribuindo com o enxofre.
Química	A gipsita pode ser utilizada como matéria prima para a produção de enxofre, ácido sulfúrico, cimento e sulfato de amônio.
Papel	O gesso pode ser utilizado como carga na produção de papel.
Tintas	O gesso pode ser utilizado como carga de tinta.
Tratamento de Água	O gesso pode ser utilizado para modificar a qualidade da água, principalmente na correção da dureza.
Cerâmica	O gesso é utilizado na indústria cerâmica, principalmente nos processos de colagem (fabricantes de louças sanitárias) e prensagem (fabricação de louças de mesa).
Medicina	O gesso é utilizado na elaboração de próteses provisórias e em ambientes laboratoriais.

Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008)

Outros seguimentos são apresentados na Tese de Kanno (2009) conforme apresentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Outros usos de gipsita e do gesso

Segmentos	Descrição
Indústria Cimenteira	Adicionado ao clínquer na fabricação do cimento para retardar o tempo de pega do cimento (responsável por 37% do consumo total nacional de gesso).
Indústria em geral	Utilizado no acabamento de tecidos de algodão; e como distribuidor e carga de inseticidas.
Indústria Alimentícia	Adicionado à água empregada na fabricação de cerveja para aumentar a sua “dureza”, utilizado também na limpeza de vinhos.
Outras aplicações	Aglomerante para giz, briquetagem do carvão, confecção de portas corta fogo, vedação de lâmpadas na mineração de carvão, vedação de engrenagens e de área onde há perigo de explosão de gases, isolantes térmicos para cobertura de tubulações e caldeiras, isolantes acústicos, etc.

Fonte: Kanno (2009).

A produção mundial de gesso distribui-se nos seguintes percentuais: América do Norte (Estados Unidos, Canadá e México) com 32%; Ásia com 32%; Europa com 16%, ficando o restante com um conjunto de países como Brasil, Chile e Argentina. Os principais produtores de gesso no mundo são, pela ordem de importância, Estados Unidos, China, Irã, Tailândia, Canadá, Espanha, México, Japão e França (PERES, BENACHOUR E SANTOS, 2008).

A exploração da gipsita no Brasil localiza-se, praticamente, na Região Nordeste. Atualmente, a localidade de maior produção é a microrregião de Araripe, em Pernambuco, que participa com mais de 90% da produção nacional e é formada pelos municípios de Araripina, Trindade, Ipubi, Ouricuri, Bodocó, Morais e Exu.

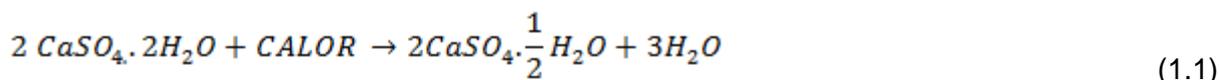
A segunda localidade mais importante é Grajaú, no Maranhão; a terceira, o município também maranhense de Codó. Existe ainda produção em Nova Olinda, no Ceará.

A mineração da gipsita no Araripe, bem como em Grajaú, Codó e Nova Olinda, é realizada de forma mecanizada, com utilização de equipamentos como rompedores hidráulicos, martelos (*vagon drill*), tratores de esteira e pás mecânicas. Atualmente, existem, no Araripe, 18 minas em operação, que produzem, aproximadamente, dois milhões de toneladas por ano (PERES, BENACHOUR E SANTOS, 2008).

1.3.2. O Gesso e suas características mecânicas

O mineral gipsita é um sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que ocorre em diversas regiões do mundo e, apresenta um amplo e diversificado campo de utilizações. O grande interesse pela gipsita é atribuído a uma característica peculiar que consiste na facilidade de desidratação e re-hidratação. A gipsita perde 3/4 da água de cristalização durante o processo de calcinação, convertendo-se a um sulfato semi-hidratado de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) que, quando misturado com água, pode ser moldado e trabalhado antes de endurecer e adquirir a consistência mecânica da forma estável re-hidratada (BALTAR; BASATOS; LUZ, 2008).

O gesso é obtido a partir da moagem e posterior calcinação do minério gipsita. O processo de calcinação consiste na desidratação da gipsita, onde $\frac{3}{4}$ da água de hidratação do sulfato de cálcio dihidratado é retirado, transformando-a em sulfato de cálcio semi-hidratado como mostra a Equação 1.1 (KANNO, 2009)



O gesso, normalmente produzido a partir da gipsita (Sulfato de cálcio bihidratado $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), classifica-se segundo o seu processo de desidratação alfa ou beta, conforme especificado no diagrama da Figura 1.1.

Segundo Bauer (2000) apud Nascimento e Pimentel (2010) o gesso é o termo genérico de uma família de aglomerantes simples constituídos basicamente de sulfatos mais ou menos hidratados e anidros de cálcio. São obtidos pela calcinação (decomposição a quente) da gipsita natural à cerca de 160°C constituída de sulfato di-hidratado de cálcio, geralmente acompanhado de certa proporção de impurezas, como sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos de cálcio e magnésio. O Total das impurezas varia desde uma porção muito pequena até um máximo de cerca de 6%.

Segundo Jorgensen, 1994 apud Baltar, Basatos e Luz (2008) os minerais de sulfato de cálcio podem ocorrer na natureza nas formas dihidratada (gipsita: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), desidratada (anidrita: CaSO_4) e, raramente, semi-hidratada (bassanita: $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), esta de difícil identificação, representando apenas cerca de 1% dos depósitos minerais de sulfato de cálcio. A gipsita cristaliza no sistema monoclinico e pode apresentar-se sob as seguintes formas variadas:

- Espato Acetinado: variedade com aspecto fibroso e brilho sedoso;
- Alabastro: variedade maciça, microgranular e transparente, usada em esculturas;
- Selenita: cristais com clivagens largas, incolores e transparentes.

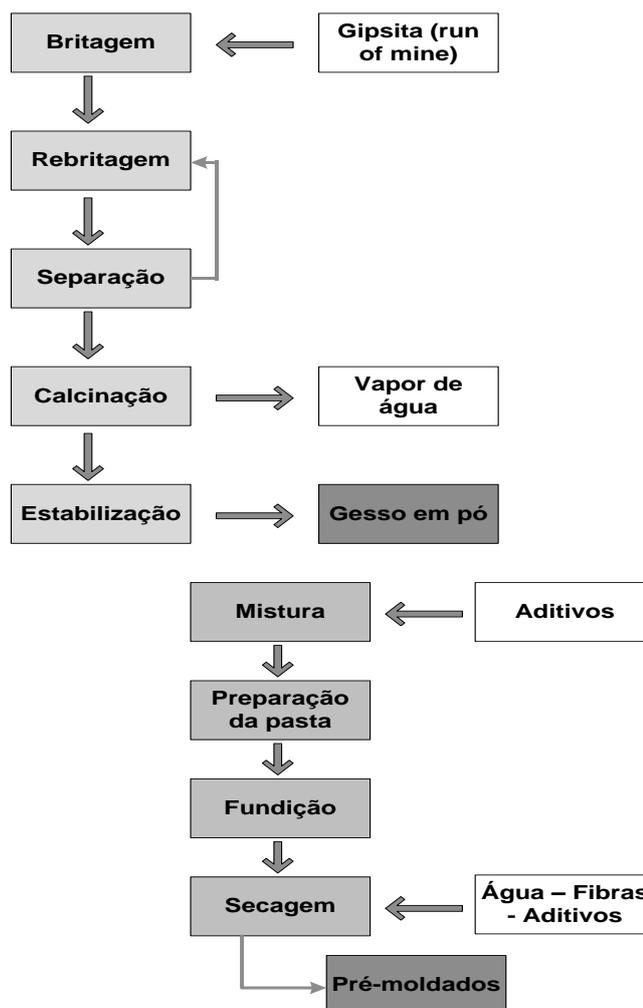


Figura 1.1 – Fluxograma do processo de produção do gesso – Sulfato de cálcio hemidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)

Fonte: Peres, Benachour e Santos (2008)

Nas jazidas do Araripe, em Pernambuco, ocorrem cinco variedades mineralógicas de gipsita (Tabela 1.3), conhecidas na região com os nomes de: cocadinha, rapadura, pedra branca (Johnson), pedra ruim e alabastro, além da variação em termos de água de hidratação, onde a ausência desta dá origem à anidrita. A utilização de cada uma dessas variedades depende do produto que se deseja obter (BALTAR *et al.*, 2004b apud BALTAR, BASATOS,

LUZ, 2008). Uma avaliação da quantidade de cada tipo e sua composição foi realizada em 1981 por Nascimento e Peres, na frente de lavra da Mineradora São Jorge, em Oricuri, e mostrou os resultados apresentados na Tabela 1.4 (PERES, BENACHOUR, SANTOS, 2008).

Tabela 1.3 – Tipos de Gipsita encontradas na Região do Araripe

<i>Tipo de Gipsita</i>	<i>Frequência (%)</i>
<i>Pedra Branca</i>	31
<i>Rapadura</i>	30
<i>Cocadinha</i>	7
<i>Alabastro</i>	10
<i>Pedra ruim</i>	22

Fonte: Peres, Benachour, Santos (2008)

Tabela 1.4 – Composição química média para os depósitos de gipsita do Araripe

<i>Determinações</i>	<i>Valores (%)</i>
<i>Umidade a 60%</i>	0,08
<i>Água combinada a 200°C</i>	19,58
<i>Perda ao fogo a 100°C</i>	1,62
<i>Resíduos insolúveis</i>	0,28
<i>Sílica em SiO₂</i>	0,32
<i>Ferro a alumínio em R₂O₃</i>	0,20
<i>Cálcio em CaO</i>	32,43
<i>Magnésio em MgO</i>	0,31
<i>Sulfato em SO₃</i>	45,04
<i>Cloreto em NaCl</i>	0,15
<i>Teor de Gipsita (média)</i>	98,65

Fonte: Peres, Benachour, Santos (2008)

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

Os minerais gipsita e anidrita ocorrem em várias regiões do mundo, sendo encontrados em depósitos de origem evaporítica, cuja formação resulta da precipitação de sulfato de cálcio a partir de soluções aquosas concentradas e condições físicas favoráveis. A evaporação e, conseqüente concentração do sal é favorecida em ambiente quente e seco (VELHO, *et al.*, 1998 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008). Os depósitos de gipsita costumam apresentar, além da anidrita, contaminantes como: argilas, quartzo, carbonatos de cálcio e magnésio, cloretos e outros sulfatos (JORGENSEN, 1994 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008).

As jazidas costumam apresentar camadas intercaladas de argilas, carbonatos, sílex e minerais evaporíticos tais como, halita e anidrita (CALVO, 2002 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008). Em Pernambuco, as jazidas estão inseridas em domínios da Formação Santana, do Cretáceo Inferior, formada por siltitos, margas, calcários, folhelhos e intercalações de gipsita (LUZ *et al.*, 2001 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008). Devido à instabilidade da gipsita e da anidrita, as espécies inicialmente formadas podem sofrer transformações em sua composição e textura quando submetidas a diferentes condições de pressão e temperatura. A gipsita acumulada na superfície terrestre pode desidratar a determinada profundidade e transformar-se em anidrita. Por sua vez, a ocorrência de fenômenos geológicos, como movimento tectônico ou erosão, pode levar o depósito de anidrita a situar-se mais próximo à superfície, onde pode experimentar uma re-hidratação em contato com águas meteóricas e voltar à forma de gipsita, denominada secundária, com formas cristalinas distintas da anidrita e da gipsita original (CALVO, 2002 apud BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008).

A gipsita também pode ser encontrada em regiões vulcânicas, especialmente, onde o calcário sofreu ação dos vapores de enxofre. Nesse tipo de ocorrência, a gipsita aparece como mineral de ganga, nos veios metálicos, podendo estar associado a diversos minerais, sendo os mais comuns a halita, anidrita, dolomita, calcita, enxofre, pirita e o quartzo (BALTAR, BASATOS, LUZ, 2008).

A composição química teórica da gipsita é apresentada na Tabela 1.5. A Tabela 1.6 mostra as principais características físicas do mineral.

Segundo Roque *et al.* (2005) apud Nascimento e Pimentel (2010) das duas moléculas de água, uma e meia está fracamente combinada e a outra meia molécula fortemente combinada. Isto explica o porquê da ocorrência de pelo menos duas fases distintas na fabricação de gesso. Na primeira fase se desprende a água fracamente combinada, é quando se obtém o semi-hidratado, e a segunda fase quando se desprende a água fortemente combinada, obtendo-se o sulfato anidro solúvel.

Tabela 1.5 – Composição química teórica do mineral gipsita

Composto	Composição (%)
CaO	32,5
SO₃	46,6
H₂O	20,9

Fonte: Baltar; Basatos; Luz (2008).

Tabela 1.6 – Propriedades físicas do mineral gipsita

Propriedades	Características
Cor	Variável, podendo ser incolor, branca, cinza e outras (dependendo das impurezas)
Brilho	Vítreo, nacarado ou sedoso
Dureza (Escala de Mohs)	2
Densidade	2,3
Hábito	Prismático
Clivagem	Em quatro direções
Morfologia e tamanho dos cristais	Varia de acordo com as condições e ambientes de formação

Fonte: Dana (1976), apud Baltar; Basatos; Luz (2008).

A velocidade de crescimento dos grãos de gipsita também influi nas propriedades mecânicas. O endurecimento ou a cristalização ocorre através de núcleos que vão se expandindo. Grande número de núcleos resulta em grande quantidade de cristais de pequenas dimensões, enquanto poucos núcleos resultam em poucos cristais de grandes dimensões. O crescimento rápido dos núcleos de cristalização propicia um grande número de núcleos mal formados, enquanto o crescimento lento favorece grandes cristais com poucas imperfeições. Em geral, um di-hidrato com cristais grandes tem menor resistência mecânica que um com

cristais menores. O tamanho dos cristais depende das impurezas do gesso, dos aditivos e das condições de cristalização (AGOPYAN, 1990 apud MAGALHÃES, 2009).

Segundo Canut (2006) a resistência dos pré-moldados e produtos a base de gesso consiste na manutenção de integridade das mesmas quando submetidas a esforços, sejam eles de tração, compressão, cisalhamento ou até mesmo impacto e desgaste. Hincapié e Cincotto (1997) apud Canut (2006) relacionam a resistência mecânica dos produtos à base de gesso com o crescimento cristalino das agulhas da pasta de gesso. Segundo os autores, 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 grossos. Estes mesmos autores afirmam que 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 adequados traços e misturas de gesso é de extrema importância e necessária para a obtenção de um produto final com bom desempenho mecânico.

Segundo Callister (2003) muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a forças ou cargas. O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou uma força que esteja sendo aplicada. Algumas resistências mecânicas para o gesso são a resistência a compressão e tração e a dureza. As propriedades mecânicas dos materiais são verificadas pela execução de experimentos de laboratórios cuidadosamente programados, que reproduzem o mais fielmente possível as condições de serviço. Dentre os fatores a serem considerados incluem-se a natureza da carga aplicada e a duração da sua aplicação, bem como as condições ambientais (CALLISTER, 2003).

Segundo Bento (2003) quando um sistema de forças atua sobre um corpo, o efeito produzido é diferente segundo a direção e sentido e ponto de aplicação destas forças. Os efeitos provocados neste corpo podem ser classificados em esforços normais ou axiais, que atuam no sentido do eixo de um corpo, e em esforços transversais, atuam na direção perpendicular ao eixo de um corpo. Entre os esforços axiais temos a tração, a compressão e a flexão, e entre os transversais, o cisalhamento e a torção.

O material está sujeito ao esforço de tração quando uma barra é submetida à uma força que tende a afastar as partículas da barra. Quando essa força tende a juntar, comprimir, apertar as partículas da barra está sujeita ao esforço de Compressão. A flexão é uma sollicitação transversal em que o corpo sofre uma deformação que tende a modificar seu eixo longitudinal. A sollicitação de cisalhamento é aquela que ocorre quando um corpo tende a

resistir a ação de duas forças agindo próxima e paralelamente, mas em sentidos contrários. A torção é um tipo de sollicitação que tende a girar as seções de um corpo, uma em relação à outra (BENTO, 2003)

Segundo a literatura é possível que um corpo esteja em equilíbrio quando:

- A soma das cargas horizontais ativas e as horizontais reativas se igualem (Condição da estrutura não andar para a direita ou para esquerda);
- A soma das cargas verticais ativas e reativas se igualem (Condição da estrutura não subir ou descer) e;
- O somatório dos cálculos dos momentos fletores (de rotação) para qualquer ponto da estrutura seja nulo (Condição da estrutura não girar em nenhum ponto).

Os semi-hidratos e os sulfatos anidros solúveis se combinam com a água através da produção de uma fina malha cristalizada, interpenetrada, responsável pela coesão do conjunto. Tal fenômeno, conhecido pelo nome de pega do gesso, é acompanhado de elevação de temperatura, por ser a hidratação uma reação exotérmica (MILITO, 2001). As resistências à flexão e/ou à compressão são influenciadas pela quantidade de água, bem como a velocidade de reação da pega. Para se obter uma boa resistência mecânica dos pré-moldados de gesso, onde se consiga uma melhor resistência à flexão e ao impacto, é necessário que se leve em consideração a natureza do gesso utilizado (α ou β) e o processo de preparação: consistência (água/gesso em peso) e a presença de aditivos.

1.3.3. Aditivação de Gessos

O Gesso ao ser misturado com a água forma uma pasta homogênea e consistente. Contudo, em poucos minutos apresenta uma perda de consistência, ganhando viscosidade, em seguida a pasta passa a ter certa resistência e endurece. Esse mecanismo é chamado de hidratação do gesso, devido ao fenômeno químico de hidratação na qual o material anidro em pó é transformado em hidratado devido a uma reação química do pó com a água.

Segundo Hincapie e Cincotto (1997) o mecanismo da hidratação é explicado por meio da teoria da cristalização, que vem sendo estudado desde 1798 por Lavoisier, e posteriormente

por Le Chatelier em 1887. Nesta teoria o semi-hidrato é misturado com a água, este se dissolve e forma uma solução supersaturada de íons SO_4^{2-} e Ca^{2+} , que precipitam em seguida, cristais de dihidrato, em forma de agulha e entrelaçados. No mecanismo de dissolução do semi-hidrato e precipitação do dihidrato, se distinguem 03 etapas: fenômeno químico de hidratação, fenômeno físico de cristalização e fenômeno mecânico de endurecimento (teoria da cristalização).

A hidratação é um processo exotérmico que libera energia em forma de calor. A medida do calor de hidratação e sua evolução em função do tempo são de grande interesse do ponto de vista tecnológico e cinético (MURAT, JEANDOT, 1973 apud HINCAPIE e CINCOTTO, 1997). Segundo estes mesmos autores a forma e tamanho dos cristais que compõem um gesso endurecido dependem de alguns parâmetros inerentes ao próprio cristal como, por exemplo, se o semi-hidrato é α ou β , os quais dependem por sua vez das condições de produção e de parâmetros externos, como a presença de aditivos e condições de hidratação (temperatura e relação a/g).

O mecanismo de hidratação pode ser explicado por meio da calorimetria. A curva de calor de hidratação de uma pasta de gesso é apresentada em três etapas (Figura 1.2) (ANTUNES; JOHN; ANDRADE, 1999 apud TAVARES *et al.*, 2010), em que, na primeira etapa, ocorre uma pequena hidratação, seguida pelo período de indução. Essa etapa é finalizada quando a taxa de elevação da temperatura ultrapassa $0,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, caracterizando o início da pega. A segunda etapa é caracterizada pela rápida elevação da temperatura, ou seja, a hidratação está evoluindo mais rápido. A terceira etapa é o instante em que a reação atinge a temperatura máxima que corresponde à conclusão da hidratação, sendo assim caracterizado o fim da pega (TAVARES *et al.*, 2010).

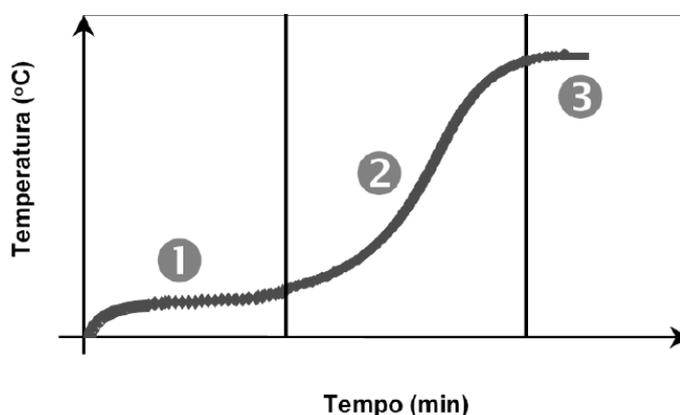


Figura 1.2 – Exemplo de curva de calor de hidratação de uma pasta de gesso
Fonte: Tavares *et al.* (2010)

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

Segundo Canut (2006) a velocidade da pega do gesso está relacionada aos fatores de temperatura e tempo de calcinação e finura, quantidade de água de amassamento, presença de impurezas e aditivos.

O uso de aditivos na produção de gessos tem como objetivo a modificação das propriedades específicas dos materiais. Os aditivos se classificam em modificadores do tempo da pega, retentores de água, incorporadores de ar, umidificantes, reforçadores de aderência, fluidificantes, aerantes e hidrofugantes (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

Os aditivos aceleradores aumentam a solubilidade do semi-hidrato acelerando a hidratação, reduzindo, assim, a pega do material. Os aditivos retardadores atuam com finalidade de retardar o tempo de pega das pastas. No grupo dos orgânicos, os mais empregados são os ácidos carboxílicos e as proteínas. No grupo dos produtos inorgânicos destacam-se os fosfatos e boratos (CANUT, 2006).

Os retardadores dividem-se em dois grupos, os que ampliam o período de indução (bórax, por exemplo) e os que interferem na cinética da formação da microestrutura do di-hidrato (caseína, por exemplo) (HINCAPIÉ, 1997 apud TAVARES *et al.*, 2010).

O comportamento dos retardadores de pega, na sua maioria, sofre forte influência do pH das pastas. Existem, portanto, retardadores de pega para o pH neutro e outros para pH alcalinos, nos casos em que as formulações dos gesso aditivados contêm cal hidratado (PERES, BENACHOUR e SANTOS, 2008).

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. Os autores 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 dihidrato, ou gesso reidratado, 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.

O 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 Bandens, *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 2×10^3 N/m². 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) do 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 divergiu. Pequenas adições de ácido tartárico previnem a adsorção de água nas vizinhanças dos grãos de gesso à redução do módulo de Young. A cristalização do dihidrato de sulfato de cálcio, originado de uma suspensão aquosa de semi-hidrato é conhecida como pega do gesso. Badens, *et al.*, (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 foi estudada. 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 LAFARGE (França) e os ácidos policarboxílicos tinham grau de pureza PA. A condutividade foi medida utilizando-se um condutímetro Metrohm 660 (Suíça). Os cristais foram observados com um Scanning Electronic Microscopy 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 foi 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.

Um modelo objetivando explicar muitas características microscópicas do gesso di-hidratado em atmosferas úmidas e secas 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 às forças de Van Der Waals e interação entre duas camadas é importante apenas para objetos no domínio coloidal.

No caso dos gessos após a pega, por causa do bom paralelismo das faces dos cristais, como as forças exercidas por eles mesmos sobre grandes áreas e são responsáveis pela coesão e resistência mecânica do gesso. Segundo o mesmo autor durante a secagem do dihidrato 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 quais 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 Å para o gesso após a pega saturado de água e cerca de 15 Å para o gesso seco. Neste caso espera-se que as moléculas de água estejam regularmente distribuídas, semelhante a um cristal sólido, resultando em 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, consideram-se materiais cuja dureza baseia-se na presença de cimento e nas propriedades físicas desses materiais. 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 umas 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 dihidrato 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 I, 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.

O tempo de pega e as propriedades mecânicas de gessos foram investigados com auxílio de diferentes técnicas: calorimetria adiabática e medidas da pressão de expansão e

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

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 foi modificada 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.

Munhoz (2008) pesquisou o efeito de quatro diferentes aditivos em pasta de gesso: o Imperwall, Masterfix, Glenium 3200 HES e o Silicone. A adição combinada de Silicone (0,6% em relação à massa de gesso) permitiu maior redução da relação/água (0,5) da pasta, e os resultados dos ensaios nos corpos-de-prova apresentam menores taxas de absorção por imersão e por fervura, menor índice de absorção por capilaridade e maior resistência à compressão (MAGALHÃES, 2009).

Magalhães e Almeida (2010) comparadas às formas de extração e obtenção da mucilagem dos cactos *Opuntia fícus-indica* e *Nopalea cochenillifera*, em forma de gel e pó, e os resultados dos corpos de prova (CPs) moldados com adição dessas mucilagens nos ensaios de absorção de água e de flexão estática. Verificou-se que existe uma relação direta entre o consumo de água e a taxa de absorção de água, e uma relação indireta entre esse consumo e a resistência à flexão estática. A adição de mucilagem de cacto permitiu a redução do consumo de água em pastas de gesso, possibilitando menores taxas de absorção de água e maiores resistências à flexão estática. O tipo de mucilagem, em gel e em pó, e a quantidade adicionada, em pastas de gesso, influenciaram os resultados dos CPs moldados.

Finalmente, 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. Incorporações de fibras naturais ou sintéticas

A literatura apresenta associações de materiais poliméricos com os pré-moldados de gesso que levaram a melhoramentos em suas propriedades. Podem-se citar testes com fibras naturais ou sintéticas.

O grande interesse pelos materiais compostos está ligado a dois fatores: o econômico e o desempenho. O fator econômico vem do fato de se conseguir materiais mais leves com melhor desempenho nas suas características mecânicas. O custo de fabricação de algumas peças em material composto pode ser também sensivelmente menor se comparado com os materiais convencionais. A leveza e as excelentes características mecânicas fazem com que os materiais compostos sejam cada vez mais utilizados dentro de atividades esportivas, aeronáuticas, automobilísticas, construção civil, etc. (PEREIRA, 2003). Inúmeros tipos de compósitos são conhecidos por apresentarem altos índices de resistência e rigidez por unidade de peso, mesmo quando submetidos a esforços combinados de tração (ou compressão), flexão e tração; elevado amortecimento estrutural; ausência de corrosão em muitos ambientes agressivos aos metais; e boa tenacidade à fratura em muitos casos (NETO e PARDINI, 2006).

A escolha entre um tipo de reforço e uma matriz depende fundamentalmente da aplicação que será dada ao material composto, características mecânicas elevadas: rigidez, resistência a ruptura, resistência a alta temperatura, resistência a ambientes agressivos, etc.. O custo em muitos casos pode também ser um fator de escolha entre um ou outro componente. Deve ser observada também a compatibilidade entre o reforço e as matrizes.

Diferentes tipos de materiais têm sido misturados ao gesso com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas. Estudos com misturas de polímeros puros, fibras, tem tido uma abordagem de sucesso para se conseguir excelentes resultados. Nas argamassas de gesso pode-se adicionar agregados leves como a vermiculita ou perita, fibras diversas como pêlos de animais, fibras sintéticas, de vidros e fibras vegetais, favorecidas pelo pH neutro do gesso, aditivos, impermeabilizantes ou hidrofugantes (MAGALHÃES, 2009).

Conforme Pereira (2003) é possível encontrar materiais naturais com propriedades que adicionadas à argamassa de gesso contribuem para a redução da permeabilidade, aumento da resistência mecânica, melhoria da trabalhabilidade e diminuição da quantidade de água na mistura.

Magalhães (2009) utilizou-se de um cacto *Opuntia ficus-indica* existente em abundância nas regiões áridas ou semi-áridas do nordeste brasileiro, muito usado como alimento de

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

animais bovinos e caprinos, para extrair um gel, uma substância viscosa, que permite à planta reter internamente água, aumentando sua resistência às altas temperaturas, chamada de mucilagem. Esta substância quando adicionada às pastas de gesso possibilitou a redução do traço e aumento do tempo de pega, permitindo a elaboração de uma pasta consistente que levou a obtenção de melhores resultados nos ensaios de absorção e flexão.

Segundo Souza (2006), construiu-se uma unidade habitacional para estudo de conforto térmico, utilizando-se blocos feitos com um compósito à base de gesso e EPS (Poliestireno expandido) triturado. Foram realizados ensaios de compressão mínima segundo as normas da ABNT para blocos de vedação. Constatou-se que os mesmos apresentaram boa resistência mecânica; boa resistência térmica; viabilidade técnica e econômica e de materiais; apresentou bom conforto térmico no interior da habitação e teve um aproveitamento ecologicamente correto, evitando descartes em lixões.

Andrade *et al.* (2006) e Mota *et al.* (2007) estudaram e analisaram o compósito do resíduo de gesso da construção civil como material inerte na produção de cerâmica vermelha, efetuando avaliação da influência sobre as propriedades mecânicas de diversos percentuais do resíduo, através do comportamento físico/mecânico do resíduo na argila de fabricação de tijolos, com o intuito de se conseguir um destino ecologicamente correto ao resíduo de gesso da construção civil. No entanto, o resultado demonstrou que houve um aumento da absorção de água pelos corpos de prova e quando se chegou a uma proporção de gesso de 20% a absorção ficou dentro das especificações técnicas para fabricação de tijolos e telhas. Por outro lado, o aumento do percentual de resíduo de gesso provoca uma queda considerável na resistência mecânica à flexão dos corpos de prova.

Leitão *et al.* (2006) estudaram o comportamento das propriedades mecânicas e elásticas de compósitos unidirecionais formados com fibra de carbono e matriz epoxídica, com o intuito de se verificar o comportamento da tensão máxima em placas conforme a orientação tomada do reforço. Chegou-se a conclusão de que a capacidade de resistência mecânica do material está intimamente ligada ao reforço utilizado do compósito, proporcionado pelo elevado desempenho que as fibras apresentam, bem como pela orientação de bobinamento que é dada a mesma na construção do material.

1.3.5. Microestrutura do Gesso

O termo microestrutura é utilizado para descrever as características estruturais encontradas nos materiais. As microestruturas podem ser caracterizadas pelo tipo, proporção e composição das fases presentes, e pela forma, tamanho, distribuição e orientação dos grãos (BRAGANÇA e BERGMANN, 2004 apud CANUT, 2006).

Segundo Canut (2006) no estudo dos materiais cerâmicos, a análise da microestrutura é empregada para explicar diferentes propriedades e, conseqüentemente, diferentes aplicações para os materiais. Uma amostra de um material de mesma composição química pode apresentar uma resistência à compressão bem superior à outra, mesmo que ambas tenham se submetido, aparentemente, ao mesmo processamento. Este fato bastante comum na análise dos materiais, quase sempre encontra explicação ao estudar-se a microestrutura, observando-se, por exemplo, o tamanho e a forma dos grãos e o volume de poros, características essas acessíveis à técnicas de análise bastante simples.

A microestrutura da gipsita, em seu estado natural, é constituída de cristais geminados de sistema monoclinico (DANA, 1969 apud CANUT, 2006). A célula unitária da gipsita é cúbica de face centrada (CFC), composta por 4 moléculas de SO_4^{2-} , 4 átomos de Ca^{2+} e 2 moléculas de água (vide Figura 1.3).

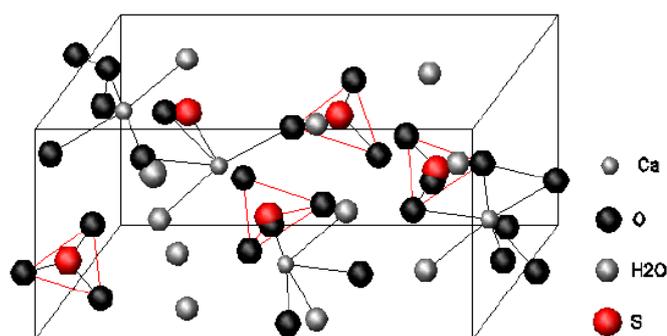


Figura 1.3 – Célula cristalina do mineral gipsita (CANUT, 2006).

A estrutura do sulfato de cálcio di-hidratado é essencialmente composta por duas camadas de grupos SO_4 . Estas estão unidas entre si fortemente por íons de cálcio formando um estrato. Estes estratos estão, por sua vez, devidamente unidos por uma camada de

moléculas de água, cada uma das quais une um íon de cálcio com um oxigênio do seu mesmo estrato e com um ou outro oxigênio do estrato vizinho (ALTABA,1980 apud CANUT, 2006).

Os cristais de gipsita podem ser definidos de diversas formas, geralmente prismáticos, grossos, tabulares ou lenticulares, com forte curvatura de faces e arestas (ALTABA,1980 apud CANUT, 2006). Podem ser encontrados incolores ou nas cores branca, bege ou amarelo, e são considerados minerais brandos, sendo possível riscá-los com a unha.

A microestrutura da gipsita pode ser modificada de acordo com o tipo de beneficiamento a que for submetida. O beneficiamento da gipsita é essencial para a obtenção de um gesso com as propriedades adequadas para um uso específico, seja como aglomerantes ou até na medicina (CANUT, 2006).

Em função da temperatura de beneficiamento a gipsita pode possuir uma fase e um sistema cristalino predominante. A mudança de fases decorridas das reações de desidratação da gipsita faz com que esta mude também o sistema cristalino como pode ser observado na Tabela 1.7 (DANA, 1969; CANUT, 2006).

Tabela 1.7 – Sistema cristalino da gipsita de acordo com seu beneficiamento

Composto Químico	Sistema cristalino	Mineral
CaSO₄.2H₂O	Monoclínico	Gipsita
CaSO₄.0,5H₂O	Hexagonal	Hemidrato
CaSO₄.εH₂O	Hexagonal	Anidrita III
CaSO₄	Ortorrômica	Anidrita II
CaSO₄	Cúbica	Anidrita I

(CANUT, 2006)

Os semi-hidratos alfa e beta possuem a mesma estrutura cristalina, entretanto, sua morfologia (tamanho e superfície do cristal) difere devido ao método de produção. As partículas de hemidrato alfa são nitidamente cristalinas e com textura lisa. Já as partículas de semi-hidrato beta são predominantemente sombrias, estriadas e preferencialmente arredondadas. As diferenças morfológicas exercem influência sobre as propriedades da pasta e do gesso endurecido (CINCOTTO *et al.*, 1985b apud CANUT, 2006).

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

O semi-hidrato beta é utilizado na indústria da construção civil, indústria cerâmica e indústria de modelagem. Dentre os tipos de gesso beta, destacam-se os de fundição e os de revestimento manual, sendo ambos produzidos no Brasil sem a adição de aditivos químicos (BALTAR *et al.*, 2003 apud CANUT, 2006).

O semi-hidrato alfa obtido com a calcinação em autoclave, passa por uma modificação na morfologia do gesso resultando em um produto mais homogêneo. Como consequência, após a mistura do gesso com água, obtém-se um produto com maior resistência mecânica e menor consistência. Esta última característica possibilita a trabalhabilidade da mistura com uma menor relação água/gesso. Pelo fato da resistência mecânica do gesso ser inversamente proporcional à relação água/gesso e, conseqüentemente, à porosidade, as pastas produzidas com o hemidrato alfa são mais resistentes que as produzidas com o beta (ANTUNES, 1999 apud CANUT, 2006).

O gesso alfa é caracterizado por apresentar cristais compactos, regulares e resistentes. Dentre as principais utilizações do gesso alfa estão: matrizes para indústria cerâmica; indústria de modelagem (usados por artistas plásticos); ortopedia; bandagens médicas; odontologia e na indústria automobilística (BALTAR *et al.*, 2003 apud CANUT, 2006).

Segundo Antunes (1999) apud Tavares (2010) os cristais de dihidrato crescem a partir de núcleos de cristalização. A quantidade de núcleos presentes na solução influencia a taxa de crescimento da microestrutura e o tamanho dos cristais. Quando existem muitos núcleos, o crescimento é rápido e os cristais formados são menores e mais numerosos por unidade de volume. Quando há formação de poucos núcleos, o crescimento é lento e são formados cristais maiores em menor quantidade.

O gesso beta possui elevada área superficial devido à sua granulometria fina e cristais porosos (Figura 1.4), portanto, é necessário água em excesso para sua formação, resultando num material de baixa resistência mecânica devido à porosidade elevada. Além do excesso de água, e a elevada área específica faz com que o gesso dissolva rapidamente, provocando o crescimento rápido e desordenado de um grande número de cristais de dihidratado, reduzindo ainda mais a resistência mecânica (KANNO, 2009).

Segundo o mesmo autor, o gesso alfa, possui áreas superficiais menores devido aos cristais grandes, bem formados e sem poros (Figura 1.5), logo a quantidade de água necessária para formação da suspensão aquosa é menor. Devido à menor área específica, o processo de dissolução dos cristais de semi-hidrato é mais lento e, conseqüentemente, os cristais de dihidratado crescem lentamente e de maneira ordenada, resultando num material de baixa porosidade e, portanto, com maior resistência mecânica.

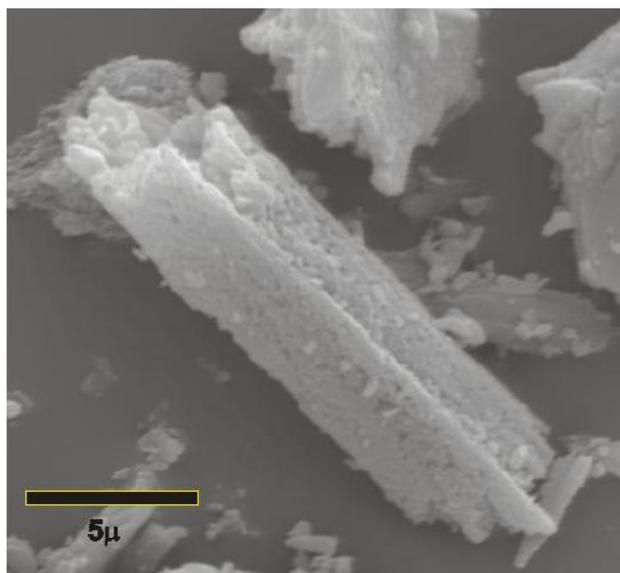


Figura 1.4 – Cristais do Gesso Beta: cristais pequenos (menores que 10μm), mal formados e porosos

Fonte: Kanno (2009)

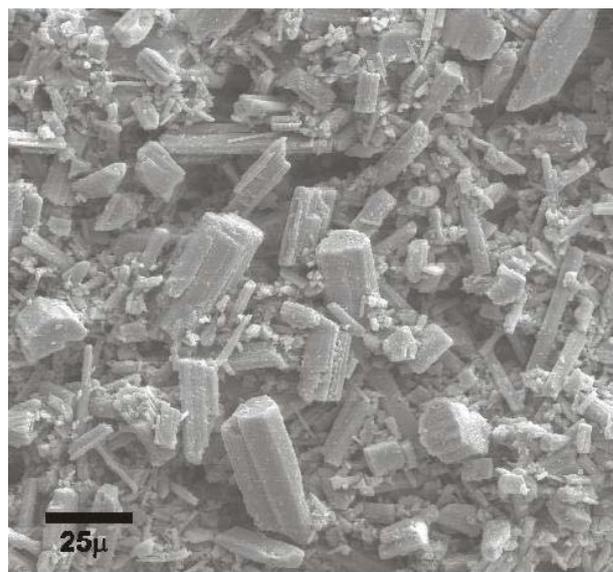


Figura 1.5 – Cristais do Gesso Alfa: cristais grandes (em torno de 20μm), bem formados e sem poros.

Fonte: Kanno (2009)

Segundo Kanno (2009), o cristal de dihidratado cresce em camadas (FAN e TENG, 2007) perpendiculares ao eixo b (paralelos ao plano (FOLLNER *et al.*, 2002)) e cada camada cresce na direção do eixo c com maior velocidade que na direção do eixo a, resultando, portanto, em cristais alongados na direção c (Figura 1.6). A presença de aditivos ou impurezas (íons ou moléculas) pode aumentar ou diminuir a velocidade de crescimento em determinados planos cristológicos (ZHANG e NANCOLLAS, 1990), o que determina o hábito final dos cristais: agulhas ou placas.

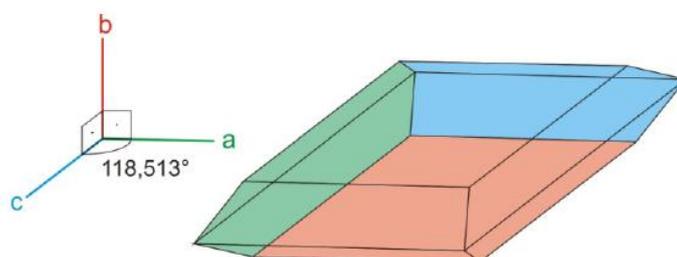


Figura 1.6 – Formação do Cristal de di-hidrtado.

Fonte: Kanno (2009)

Foi estudado o 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 compostos desenvolvidos têm a particularidade de serem sustentáveis, devido aos seus componentes reciclados, e permitem obter produtos com diferentes densidades segundo o processo fabril utilizado conforme as características pretendidas relativamente ao comportamento térmico e acústico (EIRES; JALALI; CAMÕES, 2007).

Aproveitando o grande espaço existente na microestrutura do gesso Macieira (2011) elaborou a produção de um compósito do tipo gesso-polímero, mais precisamente preenchendo a matriz de pré-moldado de gesso com monômero estireno e ativando a polimerização em massa através dos controles dos parâmetros temperatura e pressão. Os experimentos foram realizados obedecendo um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), cujos fatores foram a pressão (P), a temperatura (T) e o tempo de polimerização (t). As condições ótimas foram determinadas estudando-se os valores das variáveis aleatórias: tração na flexão, tração na compressão, absorção de água e a conversão polimérica. O valor mínimo da absorção de água (1,03%) e valores máximos encontrados da resistência de tração na flexão (9,89 MPa) e de compressão (24,80 MPa), que caracterizam o compósito gesso-polímero obtido, apresentaram-se superiores aos valores obtidos do gesso puro, o que habilita a utilização do compósito em painéis externos, possibilitando, também, considerável redução de rejeitos sólidos no manuseio desse material.

1.3.6. Prensagem de Sólidos

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 1.7). É utilizada para conformar peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem.

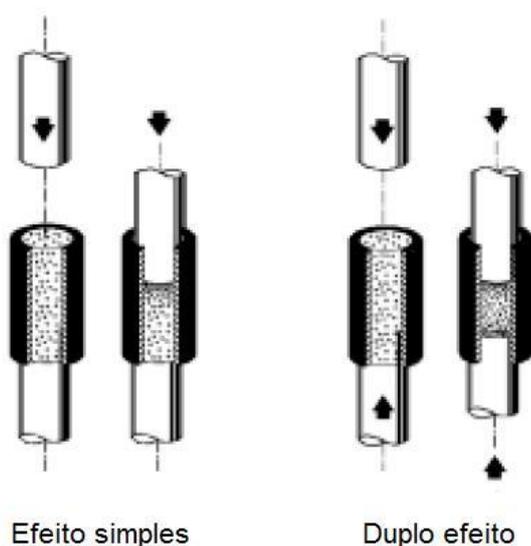


Figura 1.7 – Diferentes formas de adensamento por prensagem, adaptado de Amorós Albaro (2001)

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 1.8).

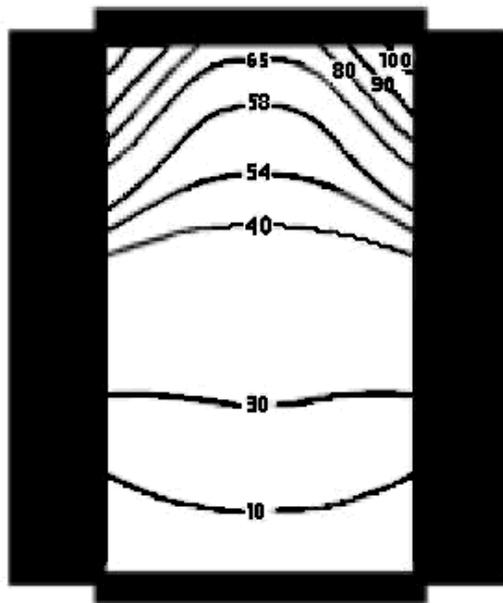


Figura 1.8 – Distribuição de pressões numa prensa, adaptado de Amorós Albaro (2001)

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.

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) seguintes:

- 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 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;
- 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 (AMORÓS ALBARO, 2001a). A velocidade com que a carga é aplicada, bem como o tempo de permanência na carga máxima, exerce um grande efeito na recuperação elástica e na saída de gases durante a compactação. Entretanto, segundo Amorós Albaro (2001a), praticamente não exercem influências sobre a compactação e sobre a microestrutura da peça resultante.

O autor Kanno (2009) em sua tese apresenta duas metodologias de prensagem de sólidos, chamadas de Empacotamento Direto de Dihidratado – EDD e a método de Umedecimento Compactação e Secagem –UCOS.

O método EDD consiste na elevada compactação do pó de dihidratado levemente umedecido, pois a água não tem a função de hidratar o gesso, mas de lubrificante que ajuda no empacotamento das partículas do gesso, fator fundamental para adesão entre as partículas, conforme apresentado na Figura 1.9. O empacotamento do pó de dihidratado depende da distribuição de tamanhos de grãos (RUBIO-AVALOS *et al.*, 2005 apud KANNO, 2009) (DTG), da pressão uniaxial aplicada, do tipo e da quantidade de lubrificante e é realizado nas seguintes etapas:

1. Seleção do pó seco de dihidratado a ser empacotado;
2. Umidificação do pó de dihidratado a uma relação específica líquida/dihidratado que depende do formato, distribuição de tamanho de grãos (DTG) e a pressão de empacotamento;
3. Compactação desse pó umedecido a pressões que variam de 50MPa a 200MPa de compressão uniaxial dentro de um molde de aço;
4. Desmolde do material compactado;
5. Secagem do corpo a aproximadamente 50°C para retirada da água em excesso acumulada nos poros do corpo de dihidratado.

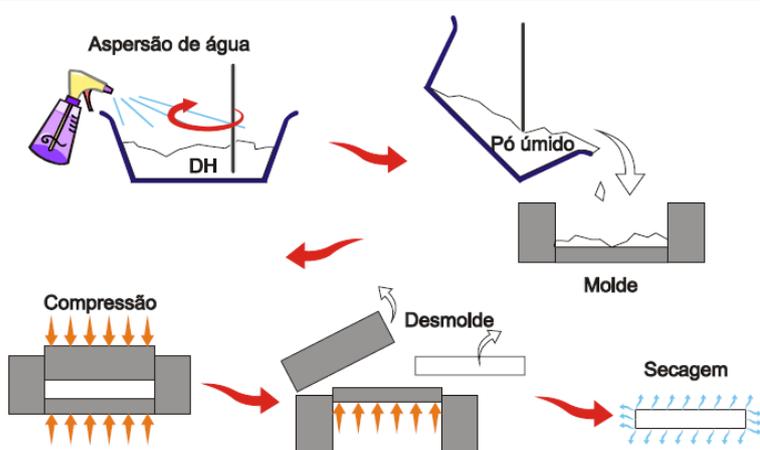


Figura 1.9 – Processo de Conformação pelo EDD

Fonte: Kanno (2009)

Já o método UCOS consiste no umedecimento do pó de gesso hidratado por aspersão de água, seguido de homogeneização e compactação desse pó úmido (Figura 1.10). A aspersão é executada até atingir uma relação água/gesso necessária para que haja uma completa hidratação. Em seguida é submetido à compactação, obtendo um corpo endurecido que pode ser imediatamente removido da fôrma. Após a compactação, a reação de hidratação inicia (monitorada pelo aumento da temperatura) e não é necessário que a pressão continue sendo aplicada para que a reação se mantenha e consuma o gesso hidratado. Essa técnica utiliza a água em dois processos fundamentais: dissolução-hidratação do hidratado e a outra, uma parcela bem menor, que fica envolvida no processo de adesão (KANNO, 2009).

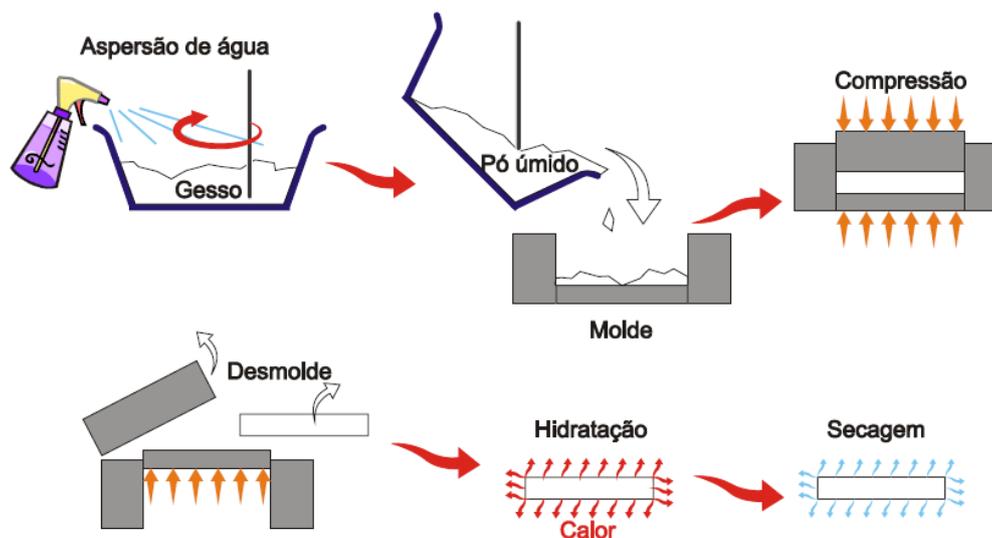


Figura 1.10 – Processo de Conformação pelo Método UCOS

Fonte: Kanno (2009)

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”. Muito 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 na fabricação de placas ou blocos para elementos de construção não estruturais, como por exemplo, paredes divisórias e revestimento de tetos ou paredes.

1.3.7. Influência da relação água/gesso e prensagem de pré-moldados

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 gessos necessários para a fabricação de cada chapa foram calculados em termos de base seca. Antes da fabricação, determinou-se que o teor de umidade de cada um dos componentes (flocos de pinus, papel jornal e papel offset possuía 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 $w = 0,4$.

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 sete 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.

O método de umedecimento, compactação e secagem (UCOS) produz a partir de gesso e água um material de elevada resistência mecânica - até 90 MPa na compressão (INOVMAT,

2005). Como a água, a temperatura, as impurezas e a microestrutura influenciaram no comportamento do material. Durante o referido estudo, foi encontrada a presença de água confinada, sendo este componente o responsável por grande parte da resistência mecânica.

O método do empacotamento direto do di-hidrato produz um material com a mesma resistência do UCOS, porém com algumas diferenças de comportamento mecânico (KANNO, 2009). Os mecanismos de tenacidade estudados por esse método foram: controle da microestrutura (aumento da superfície de ruptura), introdução de fibras poliméricas (distribuição da tensão na ponta de trinca, ramificação da tensão na ponta de trinca e contenção da abertura de trinca) e introdução de adesivo polimérico (melhora a adesão entre cristais e distribui melhor a tensão na ponta de trinca). O autor do trabalho concluiu que os compósitos de gesso reforçados com fibras poliméricas e/ou adesivos poliméricos possuem elevada resistência e comportamentos mecânicos distintos para cada tipo de compósito e método de conformação. Concluiu ainda, com o conhecimento adquirido, ser possível intervir no processamento e na microestrutura, além de se poder incorporar elementos ao material de estudos para atender condições de determinada aplicação.

Corte Real (2009) desenvolveu tecnologia próxima ao UCOS para gessos recicláveis já desenvolvidos por Cavalcanti (2006) e Monsão Júnior (2007). Contudo, a maioria do gesso produzido pelo Pólo Gesseiro do Araripe pode ser enquadrado como gesso não reciclado ou de baixo desempenho (propriedades abaixo das especificações previstas pelas normas. O Mercado aceita tais condições até que aconteça uma possível emissão de um "Selo Branco" para o Setor. Dessa forma, trabalhar com um gesso obtido de forma convencional é, no mínimo, recomendável para auxiliar na elaboração de estratégias para a redução futura de produção de rejeitos na construção civil.

1.3.8. Normas para caracterização do gesso

A NBR 13207 (1994) especifica como o gesso deve ser ensacado, armazenado e inspecionado. Além disso, estabelece as condições químicas, físicas e mecânicas exigidas para utilizar o gesso na construção civil conforme especificado nas Tabelas 1.8, 1.9 e 1.10 abaixo.

Tabela 1.8 – Exigências químicas do gesso para construção civil

Determinações químicas	Limites (%)
Água livre máx.	1,3
Água de cristalização 4,2 a	6,2
Óxido de cálcio (CaO) mín.	38,0
Anidrido sulfúrico (SO ₃) mín.	53,0

Fonte: ABNT (1994)

Tabela 1.9 – Exigências físicas e mecânicas do gesso para construção civil

Determinações físicas e mecânicas	Unidade	Limites
Resistência à compressão (NBR 12129)	MPa	> 8,40
Dureza (NBR 12129)	N/mm ²	> 30,00
Massa unitária (NBR 12127)	Kg/m ³	> 700,00

Fonte: ABNT (1994)

Tabela 1.10 - Exigências físicas do gesso para construção civil

Classificação do gesso	Tempo de pega (min) NBR 12128		Módulo de Finura
	Início	Fim	NBR 12127
Gesso fino para revestimento	> 10	> 45	< 1,10
Gesso grosso para revestimento	> 10	> 45	< 1,10
Gesso fino para fundição	4 – 10	20 – 45	< 1,10
Gesso grosso para fundição	4 – 10	20 – 45	> 1,10

Fonte: ABNT (1994)

A norma que prescreve o método para determinar as propriedades físicas do gesso na forma de pó através de granulometria e massa unitária é a NBR 12127 (1991). Esta norma determina as condições de ensaio, os aparelhos e os procedimentos.

A norma NBR 12128 (1991), prescreve o método para execução dos ensaios físicos da pasta de gesso, compreendendo as determinações de consistência normal e tempo de pega. Esta norma determina que cada amostra deve ter quantidade mínima de 3000g e deve passar através de uma peneira de 2 mm. Para cada ensaio é determinado um procedimento diferente. O Resultado da consistência normal deve ser expresso pela razão massa de água/massa de gesso. Já para o tempo de pega os resultados devem ser expressos em minutos e segundos do início e fim de pega. A média de duas determinações não deve diferir em mais de 10%.

A norma técnica que prescreve o método para determinação das propriedades mecânicas (dureza e resistência à compressão) do gesso para construção é a NBR 12129 (1991). Por tanto, esta determina o aparelho a ser utilizado em cada ensaio, as condições do ambiente, o tipo de molde, como deve ser preparado à amostra e o procedimento para determinar os ensaios e os resultados.

Para determinar as propriedade mecânicas é necessário que cada amostra contenha no mínimo 1500g de gesso que deve ser passada em uma peneira de 2 mm com auxílio de um pincel. O molde deve ter três compartimentos, permitindo a moldagem simultânea de três corpos de prova cúbicos de 50 mm de aresta.

Para calcular a massa de gesso necessária à formação de um volume de pasta suficiente para preenchimento do molde de três corpos de prova deve ser utilizada a Equação (1.2).

$$Mg = \frac{480}{0,4 + C} \quad (1.2)$$

em que:

Mg - massa do gesso, g

C - razão água/gesso determinada para consistência normal, -

Para calcular a massa de água necessária à mistura deve-se utilizar a Equação (1.3):

$$Ma = Mg \cdot C \quad (1.3)$$

Em que:

Ma - massa da água, g

Para calcular a dureza deve ser utilizada a Equação (1.4). A profundidade média T dos três corpos de prova não deve diferir mais de 15% da média global.

$$D = \frac{F}{\pi \times \Phi \times t} \quad (1.4)$$

Em que:

F = Carga, em Newton

Φ = diâmetro da esfera, em mm

t = média da profundidade, em mm

A resistência a compressão é calculado pela Equação (1.5). A resistência média dos três corpos de prova é considerada como valor da resistência à compressão se cada resultado individual não diferir mais de 15% da média calculada.

$$R = \frac{P}{S} \quad (1.5)$$

Em que:

P= carga que produziu a ruptura do corpo de prova, newtons

S = área de seção transversal de aplicação da carga, em mm²

Canut (2006) fez um exame detalhado das normas Americanas, e em especial a ASTM (American Society for Testing and Materials) relativas as prescrições e exigências físico-mecânicas aplicáveis ao gesso utilizado na construção, o que permite concluir que são em maior quantidade e contém exigências muito mais detalhadas do que as em vigor no Brasil. Dentre as normas, destacam-se:

- ASTM C 28 - Standard specification for gypsum plasters (ASTM, 2005b) que define a existência de quatro diferentes tipos de gesso para se utilizar no revestimento de tetos e paredes, a saber: gesso moído; gesso com fibras de madeira; gesso fino e gesso

especial. A norma referencia as principais propriedades que o gesso a ser utilizado em revestimentos deve possuir:

- a) pelo menos 66% de $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ (bassanita),
 - b) passar totalmente na peneira ASTM nº 14 (abertura da malha de 1,41mm) e pelo menos 60% na peneira ASTM nº 100 (abertura da malha de 0,149 mm),
 - c) resistência à compressão igual ou superior a 84 kgf/cm² (8,4 MPa),
 - d) início de pega entre 20 a 40 minutos, quando não adicionado o retardador;
- ASTM C 471M - Test methods for chemical analysis of gypsum and gypsum products (ASTM, 2001), especifica como deve ser realizada a análise química do gesso;
 - ASTM C 1396 - Specification for gypsum board (ASTM, 2004a) que contempla exigências para o uso do gesso em placas de vedação.

O mesmo autor apresenta outras prescrições normativas propostas pela ASTM e que fazem referência a outras importantes propriedades do gesso a ser utilizado como material de construção, e que curiosamente são pouco utilizadas e consultadas no Brasil, a saber:

- ASTM C 35 - Especificações para agregados inorgânicos para uso da pasta gesso (ASTM, 2005c);
- ASTM C 11 - Terminologia relativa ao gesso relacionado aos materiais de construção e sistemas (ASTM, 2005a);
- ASTM C 842 – Especificação para aplicação da pasta de gesso no interior (ASTM, 2005d);
- ASTM E11 - Especificação de tela de arame e peneiras para fins de teste (ASTM, 2004c);
- ASTM C 472 - Métodos de ensaio para testes físicos de gesso, pastas de gesso e concreto de gesso (ASTM, 2004b).

1.3.9. Escolha do Tipo de Planejamento Experimental

O planejamento experimental foi desenvolvido por Box e Wilson 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 (MATEUS *et al.*, 2001). Atualmente, ele é amplamente considerado como uma das mais importantes técnicas utilizadas para o desenvolvimento de novos produtos.

Muitos pesquisadores e profissionais discutiram como analisar e usar o planejamento experimental na prática, Segundo Carlsson (1996) a conscientização, o conhecimento e o uso de modelos de planejamentos experimentais ainda eram muito poucos, mesmo nas mais bem sucedidas empresas.

Segundo Rodrigues e Lemma (2005) para que essa metodologia atenda o objetivo desejado, é necessário haver uma integração entre o processo, a estatística e o bom senso, tanto da equipe responsável pela montagem dos experimentos, quanto da equipe responsável pela análise estatística e estratégica dos resultados.

Esses mesmo autores descrevem que as vantagens em se utilizar o Planejamento Experimental são:

- Reduzir o número de experiências ou repetições e melhorar a qualidade de informações obtida através dos resultados;
- Auxiliar os fatores simultaneamente, possibilitando verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse;
- Otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo;
- Calcular e avaliar o erro experimental. Isto é fundamental para que possamos especificar o nível de confiança estatístico com o qual poderemos estimar a reprodutibilidade do resultado desejado.

A seleção do tipo de planejamento experimental está relacionado a variedade de interações entre os níveis das variáveis determinando no delineamento, e na minimização da quantidade de experimentos, sendo estes suficientes para assegurar, de forma estatisticamente significativa, as condições ótimas operacionais para que os processos venham a gerar os melhores resultados (MANENTI, 2011).

Rodrigues e lemma (2005) dividem as variáveis em dois grupos: variáveis quantitativas ou numéricas e variáveis qualitativas ou atributos. As Variáveis quantitativas ou numéricas são aquelas que descrevem quantidades e, portanto, seus possíveis valores são descritos por números. Elas podem ser de dois tipos: Discretas, quando assumem um número determinado de valores no campo dos reais, e Contínuas em outros casos. Já as variáveis qualitativas ou atributos são aquelas que descrevem qualidades. Sendo assim, não usamos números para descrevê-las. Podem ser de dois tipos: Ordinárias, se seus valores agregam a idéias de ordem e nominais, se a idéia de ordem não está agregada.

Um planejamento experimental com k fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado um planejamento fatorial 2^k (SARAMAGO *et al.*, 2008). Consiste em realizar testes com cada uma das combinações da matriz experimental para, em seguida, analisar e interpretar os efeitos principais e de interação entre os fatores investigados, e assim, poder identificar as melhores condições de obtenção do produto ou de realização do processo sob estudo. Para exemplificar esse tipo de procedimento considera-se um planejamento fatorial de três fatores (x_1 , x_2 e x_3) e dois níveis (+1 e -1). A matriz de planejamento para um planejamento fatorial 2^3 é apresentada na Tabela 1.11.

De acordo com Atikison e Donev (1992), os efeitos dos pontos centrais fez diminuir a eficiência dos delineamentos como medida de otimização. Os delineamentos que o autor chama de Box Draper, por terem as características de rotacionalidade e um numero de 2 a 4 pontos centrais (na ausência de tornar o delineamento em blocos ortogonais), têm 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 à região experimental, onde os melhores valores-resposta estão frequentemente localizados.

Tabela 1.11 – Matriz de planejamento experimental fatorial 2^3

Teste N°	Fatores de controle			Resposta (y_i)
	x_1	x_2	x_3	
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	-1	y_4
5	-1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	y_8

Fonte: RODRIGUES, IEMMA (2005)

Delineamentos experimentais foram utilizados na otimização de processos biotecnológicos (KIRAN, *et al.*, 2001 apud SHEEJA e MURUGESAN, 2002). 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. Por outro lado, a forma de endereços (rotabilidade) extraírem o máximo de informações da concepção. Ortogonalidade e rotabilidade dependem do número de pontos no centro da concepção e na chamada distância axial α , que é à distância dos pontos em estrela a partir do centro do modelo.

Nessas condições é comum repetir apenas um tratamento, no caso, o relativo ao ponto central. 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 compostos pertencem a uma família de delineamentos eficientes, os quais requerem poucos ensaios para sua realização (LUCAS, 1976 apud DONEV e ATIKISON, 1988).

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 (distância axial) 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, 1979).

Sabendo-se 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 (MATEUS; BARBIN apud CONAGIN, 2008).

1.3.10. Considerações sobre a bibliografia

Com a análise dos trabalhos apresentados nos itens anteriores ficaram justificados os objetivos adotados para a realização do presente trabalho. A utilização de gesso de baixo desempenho como matéria-prima atende aos apelos de redução de desperdícios com materiais. A não utilização de aditivos ou incorporação de fibras reduz custos com o novo material, além de facilitar uma possível tecnologia de reciclagem futura e a aplicação de uma metodologia do tipo DCCR pode facilitar à identificação das condições ótimas necessárias às condições de implantação no Setor Gesseiro.

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORÓS ALBERO, 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 ALBERO, 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12127 (MB 3468). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas do Pó**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12128 (MB 3469). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas da Pasta**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12129 (MB 3470). **Gesso para construção - determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12130 (MB 3471). **Gesso para construção - Determinação da Água Livre e de Cristalização**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13207. **Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: 1994.
- 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.
- BADENS, E.; VEESLER, S.; BOISTELLE, R.; CHATAIN, D., Relation between Young's Modulus of set plaster and complete wetting of grain boundaries by water. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. No. 156, pp. 373-379, 1999.
- BALTAR, C. A. M; BASATOS, F. de F.; LUZ, A. B. D. **Rochas e Minerais Industriais**. Capítulo 23 – pág. 505- 526 – CETEM/2008, 2a Edição. 2008. Disponível em <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-175-00.pdf>>
- BENTO, D. A. **Fundamentos de resistência dos materiais**. 2003. Disponível em <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~antonio Brito/Resistencia_dos_materiais/CEFETSC%20-%20Apostila_Resistencia_dos_Materiais_PARTE_1.pdf>
- CALLISTER, W, D., JR. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5ª ed. 389p. 2003.
- CANUT, M. M. C.. **Estudo Da Viabilidade Do Uso Do Resíduo Fosfogesso Como Material De Construção**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós graduação em Construção Civil Universidade Federal de Minas Gerais. 153p. Belo Horizonte. 2006.
- 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

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

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

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.

CÔRTE REAL, J. C. Determinação de condições operacionais adequadas para produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica. Dissertação de Mestrado. 75 pg. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2009.

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

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, p. 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.

INOVAMAT - Inovação em Materiais Ltda. Milton Ferreira de Souza, Hebert Luiz Rosseto, Wellington Massayuki Kanno. **Peças de gesso de alta resistência e método de obtenção de tais peças**. BR n. PI0506033-8, 21 set. 2005.

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

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

LEITÃO, E. da S.; MARINUCCI, G.; CARVALHO, O.; ANDRADE, A. H. P. de . **Caracterização Mecânica de Compósitos Poliméricos Bobinados Em Diversas Orientações do Reforço**. 17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 Novembro de 2006, Foz de Iguaçu, PR, Brasil.

MACIEIRA, R. P. **Produção de compósito do tipo gesso-polímero para aplicação na fabricação de painéis externos em edificações**. Dissertação de Mestrado. 96 pg. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais do Centro de Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2011.

MAGALHÃES, A. C. T. V. D. ALMEIDA, J. G. D. **O uso da mucilagem de cacto em pastas de gesso: efeitos na absorção de água e na resistência à flexão estática**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 139-151, jan./mar. 2010.

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

MAGALHÃES, A. C. T. V. **Estudo de Fibras Vegetais, Mucilagem de Cacto e Gesso em Componentes Construtivos**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília. Brasília, 2009. 142p. Disponível em <http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/3907/1/2009_AnaCristinaTinocoVdeMagalhaes.pdf>

MANENTI, D. R. **Tratamento De Efluente Têxtil Utilizando O Processo Foto-Fenton**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2011. Disponível em <http://cac.php.unioeste.br/pos/media/File/eng_quimica/Diego%20Riciari%20Manenti.pdf>

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

MILITO, J. A.. **Avaliação do Comportamento de pastas de Gesso com Cimento Portland e Sílica Ativa para Revestimento**. Dissertação de mestrado apresentado a Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, S.P., 2001.

MOISSEY, J. M. Modificateurs de prise des plâtres. **Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux**. Vol. 5, 295-300, 1985.

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

MOTA, Maria K. de Freitas; ANDRADE, A. F. C.; BORJA, E. V.. **Estudo Comparativo de Blocos Cerâmicos em Escala Reduzida com Resíduo de Gesso Queimados em Forno Elétrico**. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa – PB, 2007.

MUNHOZ, F. C.; RENÓFIO, A.. **Uso da Gipsita na Construção Civil e Adequação para a P+L**. XIII SIMPEP Bauru – SP, Brasil, 6 a 8 de novembro de 2008.
NASCIMENTO, F. J. de F.; PIMENTEL, L. L. **Reaproveitamento De Resíduo De Gesso**. Anais do XV Encontro de Iniciação Científica da PUC-Campinas, 2010. Disponível <http://observatorioderesiduos.com.br/wp-content/uploads/2011/03/2010924_101439_502012254_resiaL.pdf>

NETO, F. L.; PARDINI, L. C.. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo, editora Edgard Blücher, 2006.

PEREIRA, Prof. J.C.. **Curso de Projeto Estrutural com Materiais Compostos**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica Grupo de Análise e Projeto Mecânico. Florianópolis, agosto de 2003

PERES, Luciano; BENACHOUR, Mohand; SANTOS, Valdemir A. **Gesso: Produção e utilização na construção civil**. 1.ed. Recife: Sebrae, 2008. 119 p

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F.. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. 1ª Ed. Campinas, SP: Casa do Pão Editora, 2005. 325p

Avelar, T. C. Otimização da produção de pré-moldados de gesso de alta resistência a partir de gesso de baixo desempenho mecânico.

SARAMAGO, S. P.; STEFFEN Jr., V.; SILVA, J. D.; SARAMAGO, S. de F. P.. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Sistemas Mistos**. FAMAT em Revista – número 11, outubro de 2008.

SOUZA, L. M. de. **Compósito a Base de Gesso e EPS para Fabricação de Casas Populares**, 17º CBECEI Mat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15 a 19 de Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

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

TAVARES, Y. V. P.; JÚNIOR, A. C. L.; SCHMITZ, I. B. T. A.; JOHN, V. M. Reaproveitamento do resíduo de gesso na execução de revestimento interno de vedação vertical. **Ambiente Construído**, n.1, v.10, p. 103-119, 2010.

CAPÍTULO II

Otimização da Obtenção de pré moldados de Gesso por Prensagem

RESUMO

Foi aplicado o delineamento composto central rotacional (DCCR) na produção de um pré-moldado de gesso composto apenas de gesso e água, esta última em combinação estequiométrica necessária apenas à cristalização do semi-hidrato em di-hidrato. O semi-hidrato utilizado foi propositalmente um material de baixo desempenho mecânico, uma vez que esse é o tipo de gesso mais comum como produto dos processos empregados pelas fábricas no Pólo Gesseiro do Araripe - Pernambuco. Os fatores foram a carga uniaxial de prensagem e o teor de umidificação da massa de gesso empregada na confecção do corpos de prova. Para análise e identificação das condições operacionais otimizadas as variáveis dependentes foram as resistências à compressão e flexão, dureza *Shore* e absorção de água. Os efeitos sobre essas variáveis resposta foram explicados à luz da Microscopia Eletrônica de Varredura. Como característica marcante do novo material pré-moldado a resistência à compressão partiu-se de um gesso comercial com 4,5 MPa de resistência à compressão e 1,5 MPa de resistência à flexão, alcançando valores superiores a 98 MPa e a 32 MPa, respectivamente.

Palavras-chave: Conformação do gesso, Relação gesso/água, Alta resistência mecânica, Gipsita, Ciclo de vida.

ABSTRACT

We used the composite rotational design (CCRD) in the production of a precast compound of gypsum plaster and water only, the latter in combination required stoichiometric only crystallisation of the hemihydrate to the dihydrate. The semi-hydrate material used was a purposely material of low mechanical performance, since this is the most common type of gypsum as a product of the processes employed by the factories in the Pole Gypsum to Araripe – Pernambuco. The factors involved were the load uniaxial pressing and the content humidification and content of the mass of gypsum used in making the specimens. For analysis and identification of optimal operating conditions optimized were the dependent variables analyzed of resistance to compression and flexion, hardness and water absorption. The effects of all these of response variables were explained in light of Scanning Electron Microscopy. With characteristic feature of the new material precast resistance to compression started from is a commercial gypsum for 4,5 MPa of resistance to compression and 1,5 MPa of resistance to flexion, reach values higher than 98 MPa and 32 MPa respectively.

Abstract: Gypsum of Conformation; relation gypsum/water; High mechanical resistance; Gypsum; lifecycle.

2.1 INTRODUÇÃO

Na literatura clássica, a palavra gesso pode ser definida como “gipsita cozida a baixa temperatura, que faz pega com a água e é por isso empregada nas moldagens” (AURÉLIO, 1975). Já em termos técnicos, pode-se definir gesso como sendo um aglomerante não hidráulico e aéreo, de origem mineral, obtido da calcinação do minério Gipsita em temperaturas em torno de 150°C (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008). Este é constituído essencialmente por sulfatos de cálcio di-hidratado, geralmente acompanhado de uma certa proporção de impurezas, como a sílica, alumina, óxido de ferro, carbonatos e magnésio (BAUER, 2001).

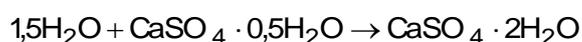
O processo comumente empregado na moldagem do gesso inicia-se na obtenção de uma pasta formada por gesso e água. Essa pasta endurece na medida em que a concentração de cristais de di-hidrato de sulfato de cálcio vai aumentando (por re-hidratação) e a de semi-hidrato vai diminuindo. A dureza da pasta chega então ao valor máximo quando toda a água evapora dos canais do gesso moldado. Nesse processo a quantidade de água necessária à hidratação dos cristais de semi-hidrato é muito maior que aquela necessária à estequiometria da reação, gerando grande porosidade no material e caracterizando-o por uma resistência mecânica relativamente baixa. Em alguns casos, dependendo da forma como o semi-hidrato é obtido, com os devidos controles de pressão e temperatura, essa resistência tende a aumentar, mas não pode ser considerada suficiente para dar ao produto final características de alta resistência mecânica, conferindo ao mesmo a denominação de gesso reciclável (CAVALCANTI, 2006, apud MONÇÃO JÚNIOR, 2008).

A redução de poros e, conseqüentemente, a redução da água de empastamento, tem provado que a estrutura final e/ou pré-moldado de gesso, adquire características de material com maior grau de resistência mecânica (CORTE REAL, 2011); permitindo ainda a utilização da porosidade remanescente para o preenchimento com material que possa aumentar essa mesma resistência mecânica dando origem a novos compósitos (KANNO, 2009, apud MACIEIRA, 2011). Adicionado a esse efeito, a prensagem, ou conformação desse material, pode levar a maiores valores de resistências, além de redução à absorção de água e da dureza, caracterizando o material final como um material de propriedades mecânicas desejáveis, independente do semi-hidrato utilizado pela pasta inicial. No presente trabalho, um delineamento experimental foi aplicado à combinação gesso de baixo desempenho mecânico e baixo teor de água, seguido de conformação uniaxial e forma metálica para obtenção de um pré-moldado de características especiais, considerado de alta resistência.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Planejamento dos Experimentos

Partindo-se de uma massa e gesso beta de baixo desempenho mecânico, como visto anteriormente, de cristais mal formados em função de falhas no controle da pressão e da temperatura de desidratação (FOLLNER *et al.*, 2002), a água foi adicionada em forma de *spray* até o percentual de umidificação desejado. Baseou-se na seguinte estequiometria:



Ou seja:

1,5 x 18 kg/kmol de água + 139 kg/kmol de semi-hidrato de sulfato de cálcio, reagem para dar 166 kg/mol de di-hidrato de sulfato de cálcio. Em outras palavras, 17,31 % em peso de água são necessários para umidificar a massa de gesso.

Diferentes composições dessa massa de gesso umidificada obedeceram o seguinte quadro de possibilidades, em função do DCCR escolhido: 4 fatoriais completos, 4 pontos centrais e 4 pontos axiais. A Tabela 2.1 ilustra as bases para o DCCR escolhido.

Tabela 2.1 - Variáveis reais e codificadas utilizadas no DCCR adotado

Fator	-1,41	-1,00	0,00	+1,00	+1,41
Relação água/gesso (X_1), kg/kg	0,13	0,15	0,20	0,25	0,27
Pressão Uniaxial Compactação (X_2), MPa	6,5	7,5	10	12,5	13,5

A metodologia proposta para produção e análise de corpos de prova pré-moldados de gesso, segundo os objetivos desse trabalho, pode ser sistematizada da seguinte forma:

- Confecção de uma forma para compressão da mistura gesso água a cargas em torno de 100 kN (faixa de trabalho do concreto);
- Confecção de corpos contendo água e gesso, combinados segundo relações estequiométricas e obtidos por prensagem mecânica de efeito simples;

- Aplicação de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) para realização dos experimentos com os corpos de prova;
- Definição de condições otimizadas de produção de pré-moldados com auxílio da Metodologia de Superfície de Resposta (MSR);
- Realização de testes de resistência mecânica e de absorção de água para definição de aplicações desses pré-moldados e;
- Comparação de benefícios técnicos, econômicos e ambientais entre pré-moldados convencionais e o produto proposto.

2.2.2 Confeção dos Corpos de Prova

A preparação da massa de gesso úmido a ser prensada foi em conformidade com a norma NBR 12129:1991, cada amostra contém no mínimo 1500g de gesso que deve ser passada em uma peneira de 2 mm com auxílio de um pincel para determinar a resistência a compressão e a flexão do material.

O gesso foi adquirido do comércio e caracterizado como gesso de baixo desempenho mecânico (propriedades físicas e mecânicas abaixo de especificações das NBR's 12129 e 12127).

A umidificação do gesso para posterior e imediata prensagem foi realizada com auxílio de um recipiente dotado de tampa para borrifamento da água, como forma de distribuir homoganeamente o líquido no interior da massa de sólidos (INOVAMAT, 2005).

A confeção dos corpos de prova através de prensagem foi realizada com auxílio de uma forma apropriadamente dimensionada em aço inoxidável 304 (AISI 304). A forma compreende uma base de 08 cm de largura por 20 cm de comprimento por 02 cm de espessura (Figura 2.1(a)). A câmara para receber a massa de gesso úmido para prensagem tem paredes de 04 cm de largura interna por 16 cm de comprimento interno e altura de 15 cm. Essa forma também foi confeccionada em chapa de AISI 304 de 02 cm de espessura. Para que a massa de gesso seja prensada de forma uniaxial, a câmara possui uma espécie de tampa que se ajusta à mesma como um gabarito, cuja folga entre suas dimensões e as dimensões internas da câmara é de 0,5 mm (Figura 2.1 (b)). As paredes da forma podem ser separadas

com auxílio de parafusos para a retirada do corpo de prova. A câmara de prensagem também pode ser separada da base por meio de retiradas de parafusos. Para que a forma não sofresse nenhuma deformação durante ou após a prensagem, foram introduzidos estais nas extremidades e centros das paredes (Figura 2,1(c)).

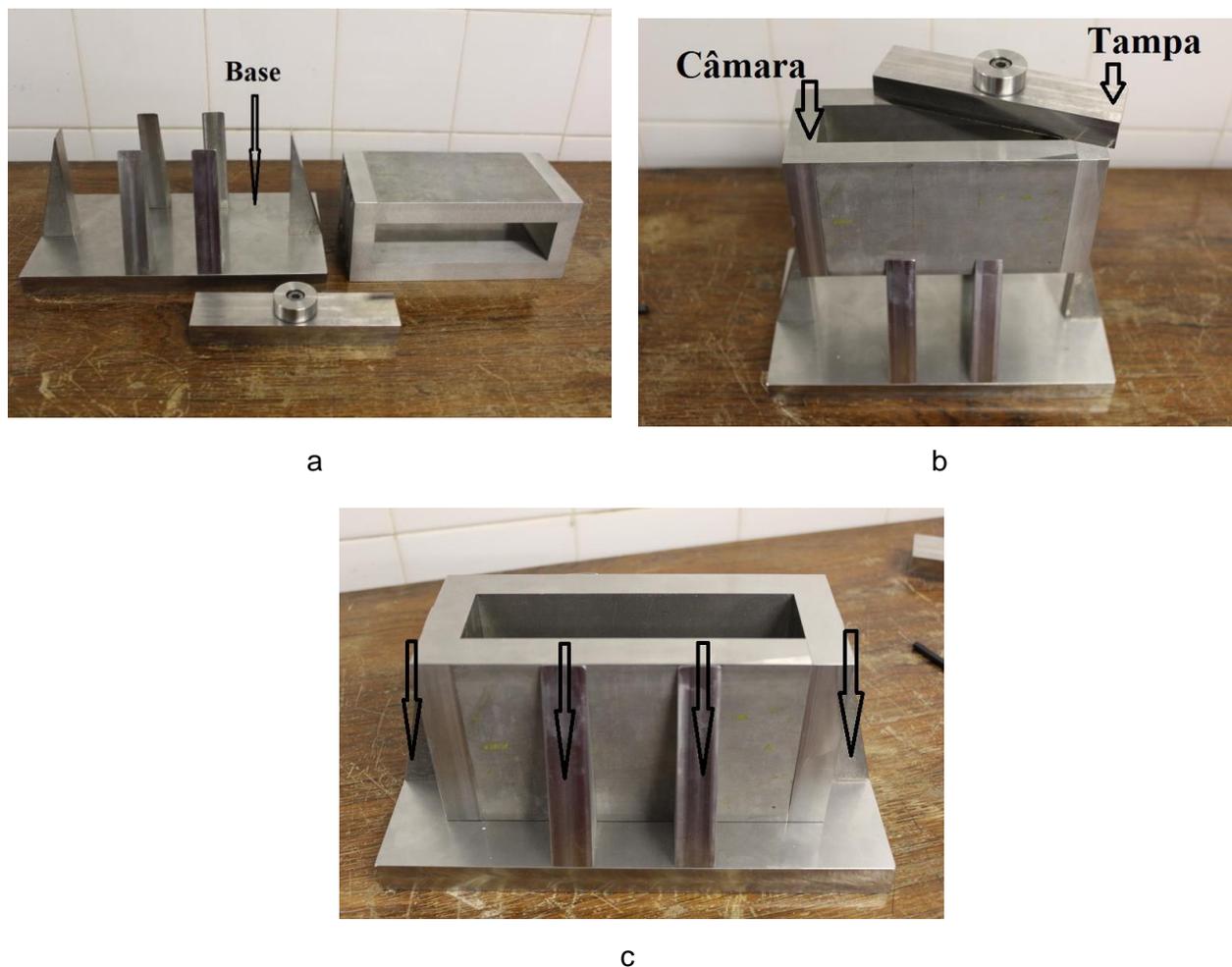


Figura 2.1 - Forma prensagem de corpo de provas:(a) base; (b) câmara e tampa e; (c) estais nas extremidades e centros de parede

Para a confecção dos corpos de prova foi utilizada uma máquina de testes universal, marca EMIC, modelo DL 10000, munida de sensor ótico de velocidade com resolução de 0,01 mm, capacidade máxima de 100 kN e instalada no CT-Araripe (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Máquina universal marca EMIC modelo DL 10000 instalada no CT-Araripe

2.2.3. Análise dos dados

A seguir são comentadas as técnicas utilizadas nas análises dos dados experimentais.

Resistência à compressão - Na medida direta da resistência à compressão do material foi utilizado o ensaio destrutivo de compressão simples, no qual o corpo prismático é submetido a uma compressão uniaxial até a ruptura. A resistência mecânica à compressão do material foi adotada como aquele de valor máximo suportado pelo corpo durante o ensaio (NBR 12129, 1991). Na Figura 2.2 é apresentada a prensa utilizada nos testes de resistência à compressão, munida do Software *TESC* para registro dos valores de resistência mecânica. A expressão de cálculo da resistência mecânica à compressão, com base na Figura 2.3 foi dada por:

$$\sigma_C = \frac{F_{\text{máx}}}{A_S} \quad (2.1)$$

em que σ_C é a resistência à compressão (MPa), $F_{\text{máx}}$ é a força máxima atingida durante o teste (N) e A_S é a área da seção transversal do corpo de prova mm^2 .

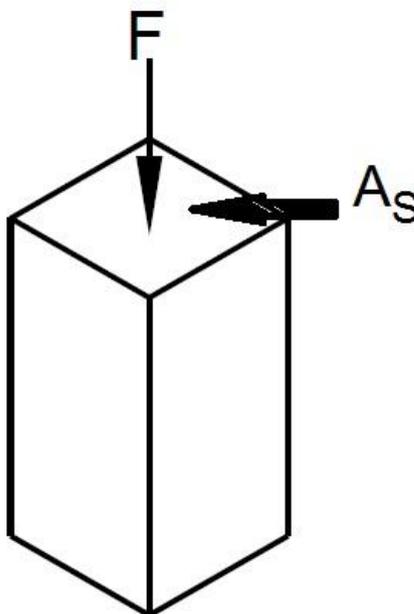


Figura 2.3 - esquema com componentes para o cálculo da resistência à compressão mecânica

Os corpos para esse tipo de teste foram confeccionados após a ruptura dos corpos submetidos aos testes de resistência à flexão, mantendo-se uma área de teste de 4 cm por 4 cm, num total de 16 cm².

Resistência à Flexão - foi utilizado o ensaio simples de tração na flexão (NBR 12142, 1991), utilizando como máquina de testes a mesma daquela para os testes de compressão. O ensaio utilizou três pontos como medida indireta da ruptura à flexão. A máxima tensão de flexão suportada pelo corpo de prova durante o ensaio foi registrada pelo *TESC*. A expressão de cálculo utilizada, conforme a Figura 2.4, foi:

$$\sigma_{TF} = \frac{3 \cdot P_{\text{máx}} \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (2.2)$$

em que:

σ_{TF} - resistência à tração na flexão em, MPa

$P_{\text{máx}}$ - força máxima atingida durante o ensaio, N

L - distância entre os apoios, mm

b - largura do corpo de prova, mm

d - altura do corpo de prova, mm

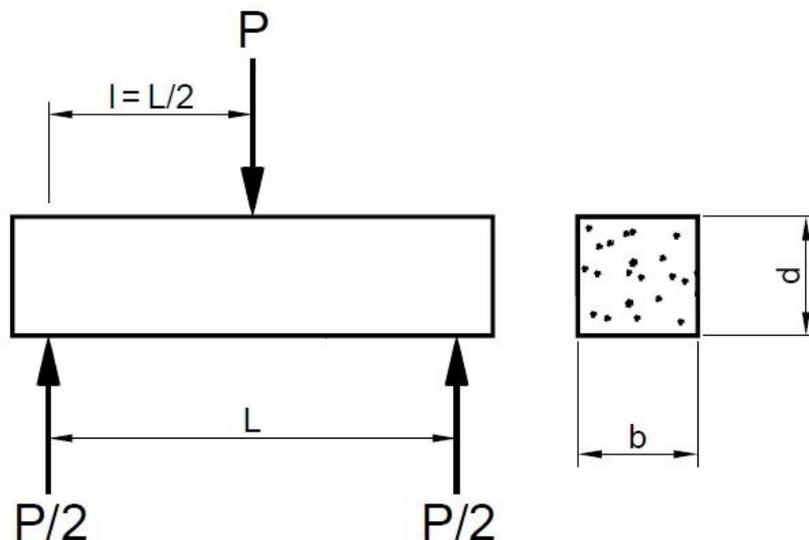


Figura 2.4 - Esquema com geometria utilizada no cálculo da resistência à tração na flexão

Os corpos de prova para esse tipo de teste foram produzidos a partir de uma massa constante de gesso umidificado de cerca de 43 g. Com as variações de pressões uniaxiais de conformação e das relações água/gesso, esses corpos atingiram alturas finais (d) diferenciadas, com densidade máxima de 2,7 correspondente a uma pressão uniaxial de conformação de 13,5 MPa.

Absorção de Água - Em um recipiente aqueceu-se água até a ebulição em uma quantidade suficiente, de modo a se manter todos os corpos de prova imersos. Os corpos de prova foram pesados e em seguida colocados no recipiente com água, descontinuando o aquecimento, onde permaneceram por duas horas, mantendo-os sempre cobertos pela água. Transcorridas duas horas os corpos de prova foram retirados da água e o excesso de água da superfície foi seco até que o corpo não apresentasse mais brilho. De acordo com a equação a seguir, foram calculados os percentuais de absorção de água para cada corpo.

$$A_a = \left| \frac{M_{cps} - M_{cpu}}{M_{cps}} \right| \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

em que:

Aa - percentagem de absorção de água, %

Mcps - massa do corpo de prova seco, kg

Mcpu - massa do corpo de prova úmido, kg

2.2.4 Microscópio de Varredura

Para observar os efeitos da pressão uniaxial resultou sobre a formação de cristais do gesso produzido, foi utilizado o método de microscopia eletrônica de Varredura (MEV: JSM 5600 LV JEOL) pertencente à Universidade Católica de Pernambuco (Figura 2.5). As amostras de gesso não foram submetidas a tratamentos especiais como o de metalização, para serem observadas ao MEV.



Figura 2.5 – Microscopia eletrônica de varredura da Universidade Católica de Pernambuco

Fonte: Morção Jr (2008)

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Análise das Superfícies de Resposta

A metodologia de superfície de resposta foi utilizada com auxílio do software STATISTICA da StatSoft®, Versão 7.0. Aplicada ao DCCR apresentado pela Tabela 2.1, os resultados gerados encontram-se na Tabela 2.2. Nessa tabela observa-se que as condições máximas de resistências mecânicas à compressão e à flexão correspondem também, de certo modo às mínimas de absorção de água, ou seja, os experimentos 4 e 8, onde as pressões uniaxiais alcançaram valores de 12,5 MPa e 13,5 MPa, respectivamente. A resistência à compressão passa de cerca de 4,5 MPa, máxima no gesso comercial utilizado, para cerca de 21,7 vezes, ou seja, 98 MPa no gesso submetido ao processo de conformação por prensagem uniaxial de 12,5 a 13,5 MPa. A resistência à flexão também varia nessas situações de 1,5 MPa a 32,0 MPa. No caso da absorção de água tem-se uma redução de valores que vai de cerca de 25,0 % no gesso convencional para cerca de 2,6 % no gesso conformado mecanicamente.

Tabela 2.2 – Matriz de planejamento e respostas resultantes da aplicação do DCCR

<i>Corrida</i>	<i>Relação água/gesso (X₁) kg/kg</i>	<i>Pressão Uniaxial de Compactação (X₂) MPa</i>	<i>Resist. à Comp. (Y₁) MPa</i>	<i>Resist. à Flexão (Y₂) MPa</i>	<i>Absorção de Água (Y₃) %</i>
1	0,15(-1)	7,5(-1)	75,00	25,00	4,56
2	0,25(+1)	7,5(-1)	80,00	27,00	2,78
3	0,15(-1)	12,5(+1)	77,00	26,00	4,35
4	0,25(+1)	12,5(+1)	96,00	32,00	2,45
5	0,13(-1,41)	10(0)	83,00	28,00	3,01
6	0,27(1,41)	10(0)	94,00	31,00	2,69
7	0,2(0)	6,5(-1,41)	73,00	24,00	4,78
8	0,2(0)	13,5(1,41)	98,00	32,00	2,56
9	0,2(0)	10(0)	91,00	30,00	2,80
10	0,2(0)	10(0)	91,00	31,00	2,83
11	0,2(0)	10(0)	90,00	30,00	2,78
12	0,2(0)	10(0)	89,00	31,00	2,79

2.3.2 Determinação de Condições Operacionais Otimizadas

A análise de variância dos valores experimentais para a obtenção da resistência à compressão forneceu a Tabela 2.3. Os valores de F (Constante de Fisher-Snedecor) e p (nível de confiança) demonstraram que todos os termos para um modelo matemático foram significativos, ou seja, maiores de 24 e menores que 0,05, respectivamente. O erro puro, ou erro experimental, foi considerado muito pequeno, indicando um excelente domínio experimental da técnica de obtenção do gesso conformado uniaxialmente. A variância explicada, nesse caso, também justifica o uso do modelo matemático para previsão dos experimentos, uma vez que esse modelo consegue explicar 91,3 % das variações do fenômeno ao intervalo de confiança de 95 %:

$$Y_1 = 7,79 + 143,89 \cdot X_1 - 850,00 \cdot X_1^2 + 8,98 \cdot X_2 - 58,00 \cdot X_2^2 + 28,00 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (2.4)$$

Tabela 2.3 - ANOVA para a resistência à compressão

<i>Fator</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
<i>X1</i>	140,7536	1	140,7536	153,5464	0,001132
<i>X1*X1</i>	28,9000	1	28,900	31,5273	0,011167
<i>X2</i>	440,3820	1	440,3820	480,4168	0,000208
<i>X2*X2</i>	84,1000	1	84,1000	91,7455	0,002414
<i>X1*X2</i>	49,0000	1	49,0000	53,4545	0,005284
<i>Lack of Fit</i>	66,8644	3	22,2881	24,3143	0,013170
<i>Pure Error</i>	3,7500	3	0,9167		
<i>Total SS</i>	796,9167	11			

$$R^2 = 91,3\%$$

SS - Soma quadrática; df - grau de liberdade; MS - Média Quadrática

A Figura 2.6 apresenta o diagrama de Pareto para a resistência à compressão após a conformação mecânica do gesso comercial de baixo desempenho mecânico. O referido diagrama mostra que o termo linear relativo à pressão de conformação uniaxial é o mais significativo estatisticamente, seguido da relação linear gesso/água e posteriormente da relação quadrática da referida pressão. Todos os termos são estatisticamente significativos e não pode prever variações precisas de compressão com base na variação de apenas um dos fatores (pressão uniaxial e relação gesso/água), uma vez que todos os termos de interação são significativos.

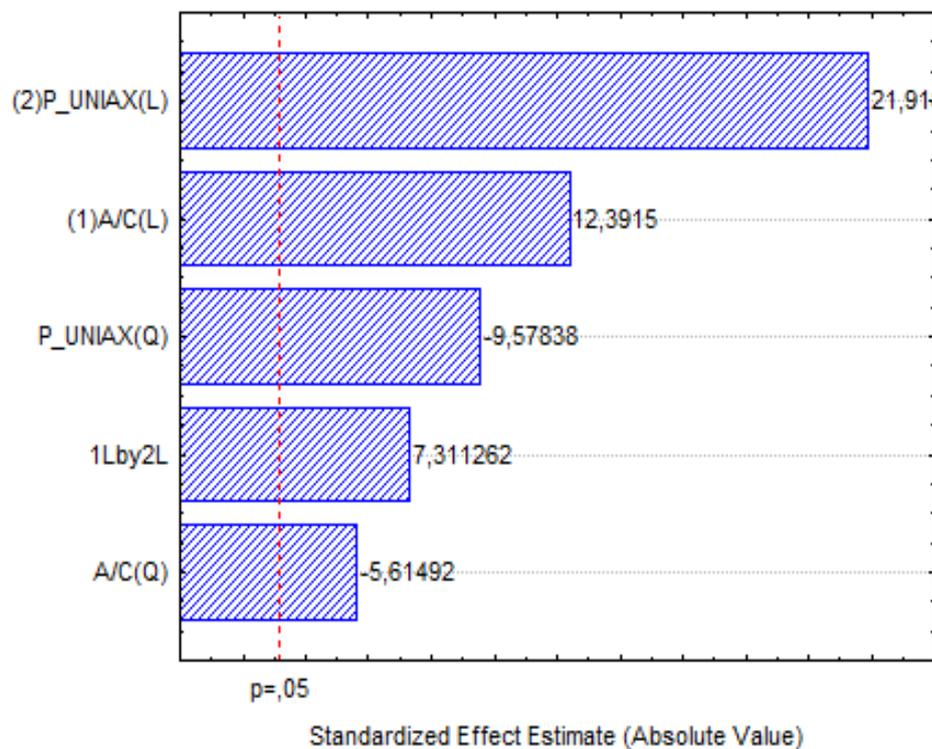


Figura 2.6 - Diagrama de Pareto para a resistência à compressão

A Figura 2.7 mostra um gráfico tridimensional da resistência à compressão, em função da relação gesso/água e da pressão uniaxial, indicando a tendência a um valor de saturação para essa propriedade com os aumentos dos valores desses fatores. O pouco paralelismo entre as curvas de nível formadas com auxílio desses fatores (Figura 2.8) reforçam as previsões do Diagrama de Pareto sobre os efeitos do termo interativo dos referidos fatores.

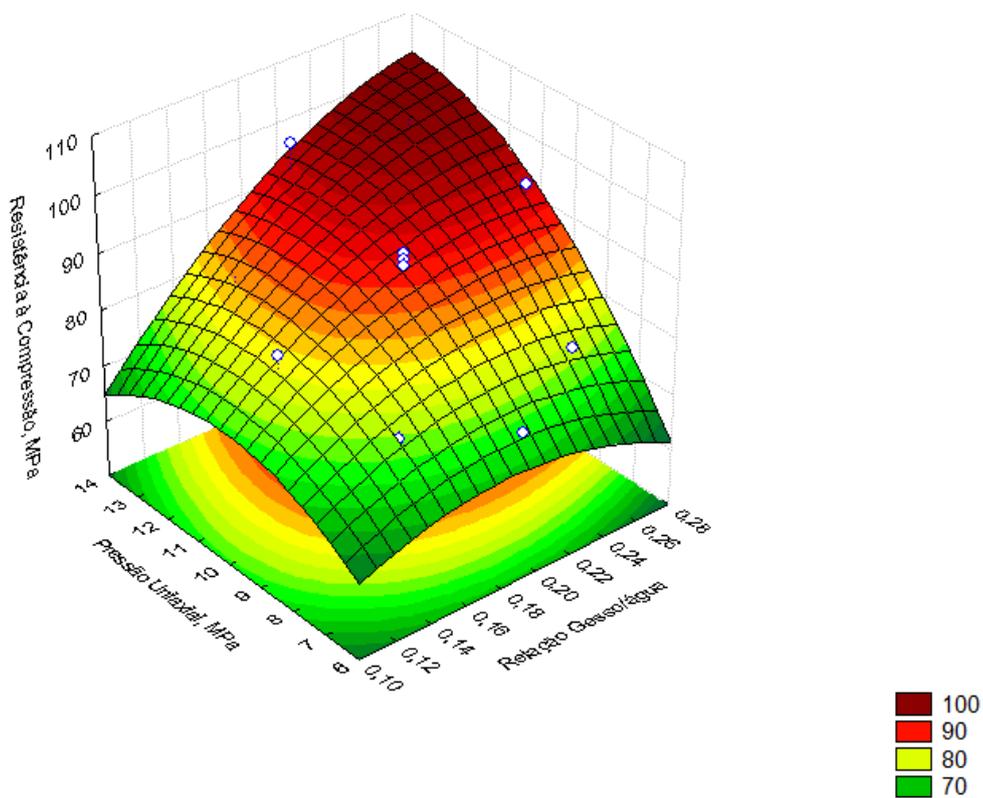


Figura 2.7 - Resistência à compressão em função da pressão de conformação e da relação gesso/água

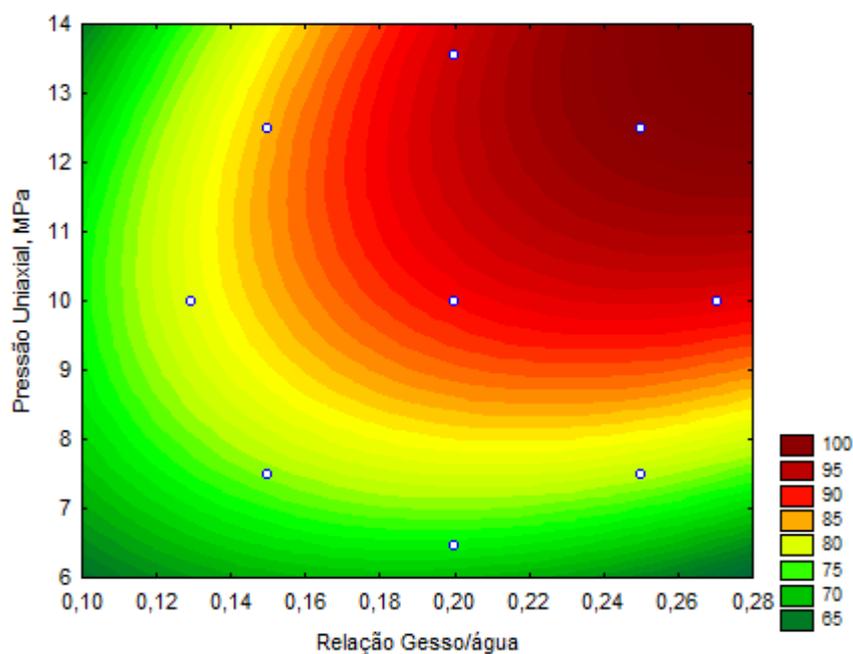


Figura 2.8 - Curvas de nível para a resistência à compressão

A análise de variância dos valores experimentais para a obtenção da resistência à flexão forneceu a Tabela 2.4. Os valores de F e p demonstraram que todos os termos para um modelo matemático foram significativos, ou seja, maiores de 4 e menores que 0,05, respectivamente. A falta de ajuste (Lack of Fit) foi maior que 0,05 para p, que significa que não existe falta de ajuste, ou que o ajuste foi satisfatório. O erro puro, ou erro experimental, foi considerado muito pequeno, indicando um domínio da técnica experimental de obtenção do gesso conformado uniaxialmente. A variância explicada, nesse caso, também justifica o uso do modelo matemático para previsão dos experimentos, uma vez que esse modelo consegue explicar 93,2 % das variações do fenômeno ao intervalo de confiança de 95 %:

$$Y_2 = 6,28 + 75,61 \cdot X_1 - 325,00 \cdot X_1^2 + 4,36 \cdot X_2 - 25,00 \cdot X_2^2 + 8,00 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (2.5)$$

Tabela 2.4 - ANOVA para a resistência à flexão

<i>Factor</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
X1	13,11396	1	13,11396	39,3419	0,008181
X1*X1	4,22500	1	4,22500	12,6750	0,037815
X2	46,62742	1	46,62742	139,8823	0,001299
X2*X2	15,62500	1	15,62500	46,8750	0,006378
X1*X2	4,00000	1	4,00000	12,0000	0,040519
Lack of Fit	4,88362	3	1,62787	4,8836	0,112692
Pure Error	1,00000	3	0,33333		
Total SS	86,91667	11			

$$R^2 = 93,2\%$$

SS - Soma quadrática; df - grau de liberdade; MS - Média Quadrática

A Figura 2.9 apresenta o diagrama de Pareto para a resistência à flexão após a conformação mecânica do gesso comercial de baixo desempenho mecânico. O referido

diagrama, conforme ocorreu no teste de compressão, demonstra que o termo linear relativo à pressão de conformação uniaxial é o mais significativo estatisticamente, seguido da relação de pressão uniaxial quadrática e posterior da relação linear gesso/água. Todos os termos são estatisticamente significativos, pois estão acima do nível de confiança (p).

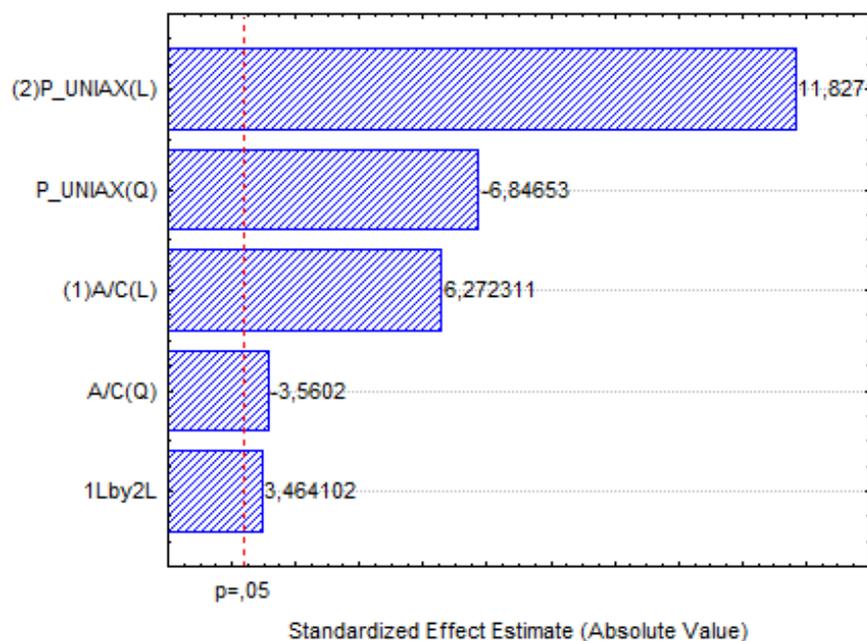


Figura 2.9 – Diagrama de Pareto para resistência a flexão

A Figura 2.10 mostra um gráfico tridimensional da resistência à flexão, em função da relação gesso/água e da pressão uniaxial, indicando a tendência a um valor de saturação para essa propriedade com os aumentos dos valores desses fatores, cujo melhor resultado de resistência a flexão está na faixa de 32 MPa. As curvas de nível formadas com auxílio desses fatores (Figura 2.11) apresentam pouco paralelismo, reforçam as previsões do Diagrama de Pareto sobre os efeitos do termo interativo dos referidos fatores.

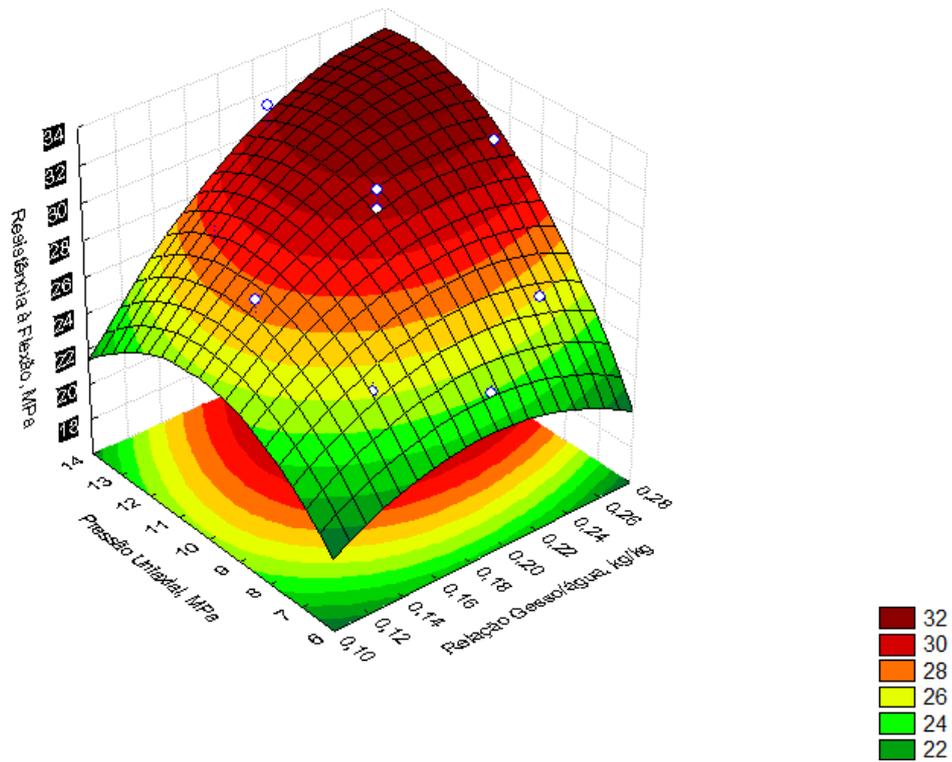


Figura 2.10 - Resistência à flexão em função da pressão de conformação e da relação gesso/água

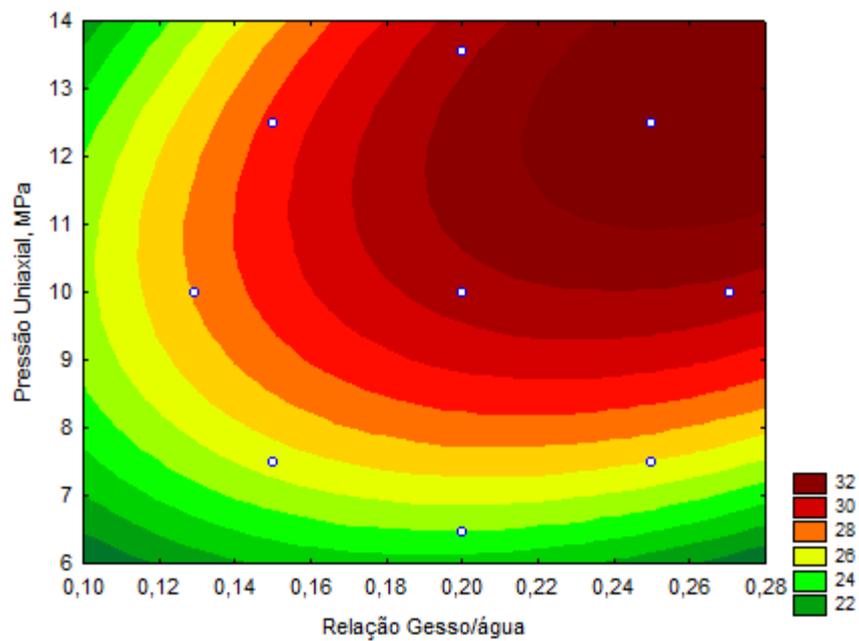


Figura 2.11 - Curvas de nível para a resistência à flexão

A análise de variância dos valores experimentais para a obtenção de absorção de água forneceu a Tabela 2.5. Os valores de F e p demonstraram que a maioria dos termos para um modelo matemático foram significativos. O erro puro, ou erro experimental, mas uma vez, foi considerado muito pequeno, indicando um considerável domínio experimental da técnica de obtenção do gesso conformado uniaxialmente. A variância explicada, nesse caso, também justifica o uso do modelo matemático para previsão dos experimentos, uma vez que esse modelo consegue explicar 97,5 % das variações do fenômeno ao intervalo de confiança de 95 %:

$$Y_3 = 15,78 - 15,08 \cdot X_1 + 37,50 \cdot X_1^2 + 1,90 \cdot X_2 + 0,08 \cdot X_2^2 - 0,24 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (2.6)$$

Tabela 2.5 - ANOVA para a absorção da água

Factor	SS	df	MS	F	p
X1	0,12144	1	0,123144	263,88	0,000508
X1*X1	0,56250	1	0,56250	120,54	0,001618
X2	5,813290	1	5,813290	12457,05	0,000002
X2*X2	1,624090	1	1,624090	3480,19	0,000011
X1*X2	0,003600	1	0,003600	7,71	0,069137
Lack of Fit	0,188716	3	0,062905	134,80	0,001070
Pure Error	0,001400	3	0,000467		
Total SS	7,75467	11			

$$R^2 = 97,5\%$$

SS - Soma quadrática; df - grau de liberdade; MS - Média Quadrática

A Figura 2.12 apresenta o diagrama de Pareto para absorção de água. O referido diagrama mostra mais uma vez, que o termo linear relativo à pressão de conformação uniaxial

é o mais significativo estatisticamente, seguido da relação quadrática da referida pressão e posteriormente da relação linear gesso/água. Contudo, a interação da pressão uniaxial com a relação gesso/água ficou abaixo do nível de confiança ($p=0,05$). Dessa forma é possível considerar que se pode prever variações precisas de absorção de água com base na variação de apenas um dos fatores (pressão uniaxial e relação gesso/água).

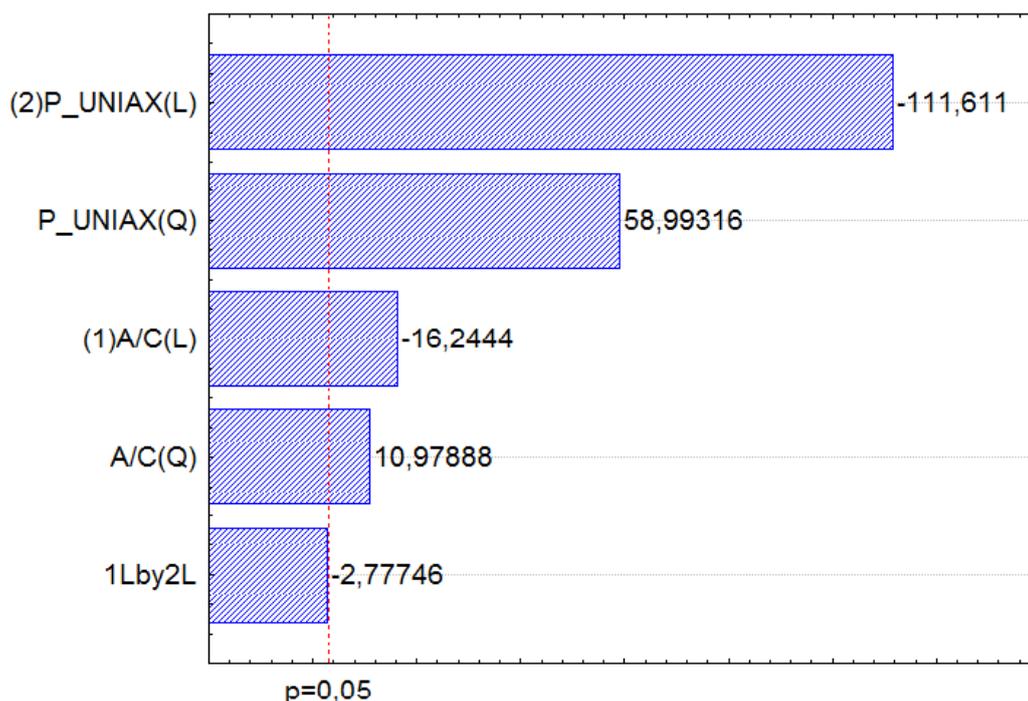


Figura 2.12 – Diagrama de Pareto para a Absorção de Água

Ao contrário dos resultados anteriores apresentados, a Figura 2.13 mostra um gráfico tridimensional da absorção de água, em função da relação gesso/água e da pressão uniaxial, indicando a tendência decrescente para essa propriedade com a diminuição dos valores desses fatores, cujo melhor valor está na faixa de 2,5% de absorção de água. A baixa interação entre esses fatores (Figura 2.14) reforçam as previsões do Diagrama de Pareto sobre os efeitos do termo interativo.

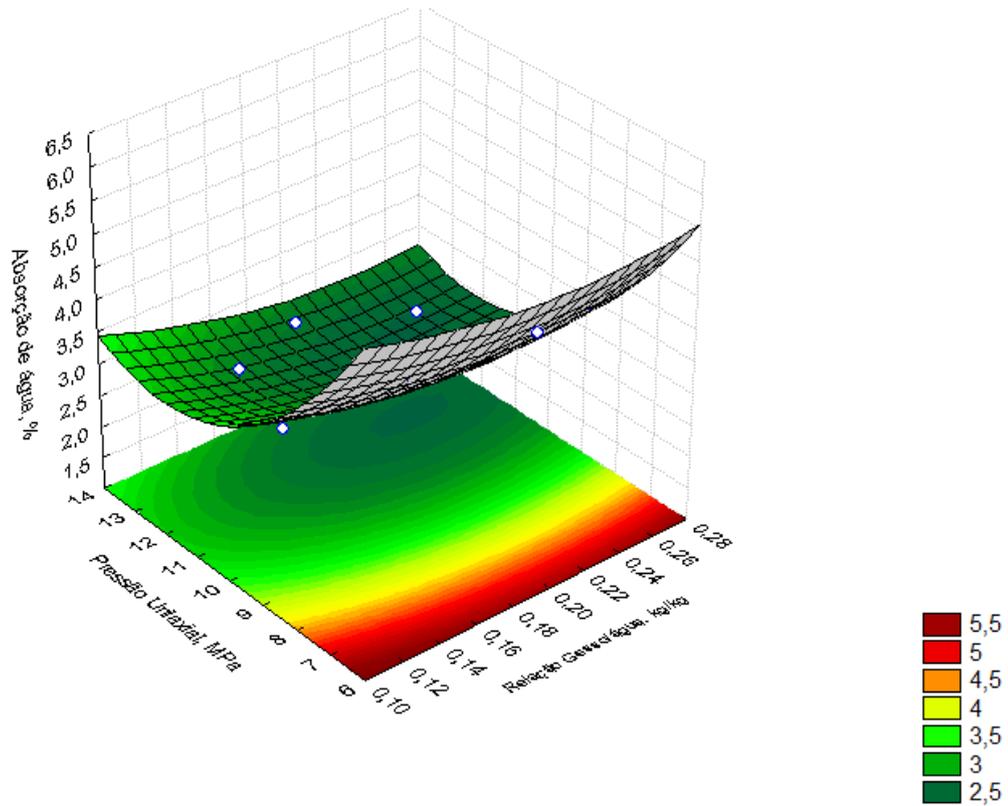


Figura 2.13 – Absorção da Água em função da pressão de conformação e da relação gesso/água

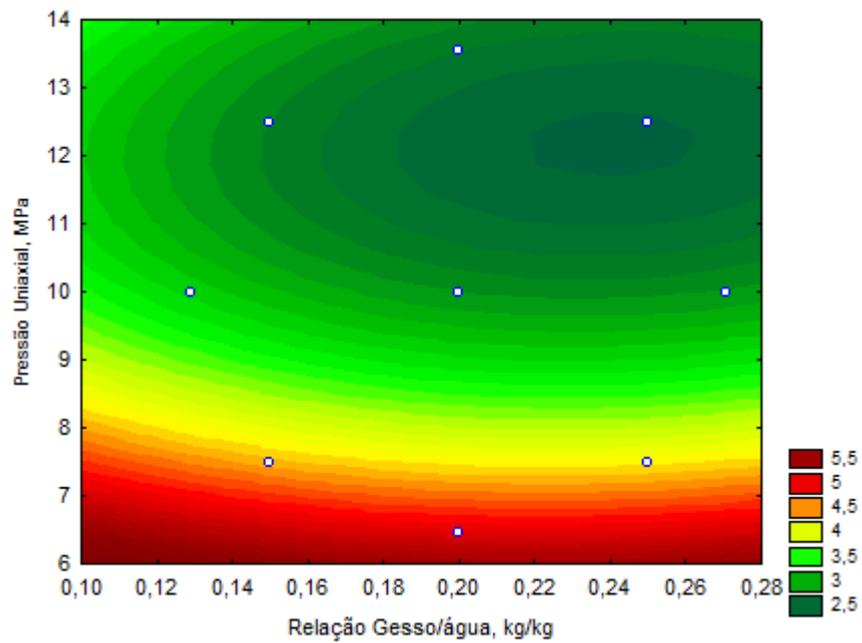


Figura 2.14 - Curvas de nível para a Absorção de Água

Para observar as variações sofridas pela microestrutura dos corpos de prova foram levadas ao MEV amostras hidratadas do semi-hidrato utilizados em nossos testes, moldadas com auxílio da formação de uma pasta (70 % de água em peso em relação ao gesso) e sem auxílio de prensagem. A Figura 2.15 ilustra a microestrutura do gesso hidratado, caracterizada por cristais esfacelados pelo processo de fabricação sem controle de pressão e temperatura (baixo desempenho mecânico), apresentando ainda significativo espaçamento entre cristais o que caracteriza considerável porosidade do material.

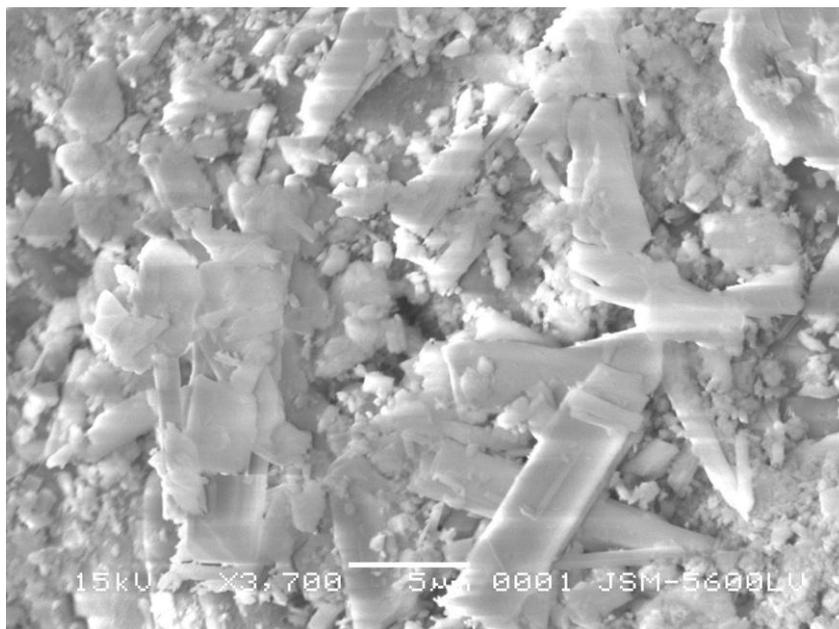


Figura 2.15 – Micrografia dos cristais do gesso hidratado utilizado nos experimentos e observados com auxílio de MEV

A Figura 2.16 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 foram observados cristais muito mais alongados e conformados em forma de feixes, reduzindo os espaços entre cristais, configurando um material com baixíssima porosidade e, conseqüentemente, muito maior resistência mecânica à compressão.

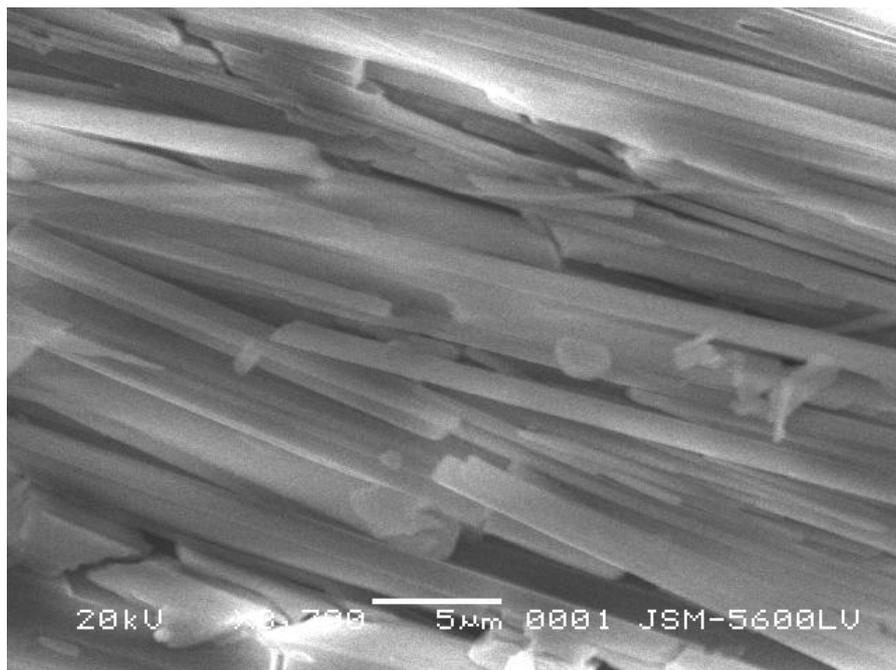


Figura 2.16 – Micrografia dos cristais dos corpos de prova produzidos por prensagem e observados com auxílio de MEV

2.4 Conclusão e Sugestões

Foi possível repetirmos experimentos de conformação uniaxial para um gesso comercial considerado de baixo desempenho mecânico, obtendo um gesso de alto desempenho com resistência mecânica de compressão, semelhante a de um material estrutural, da ordem de 98 MPa.

Os experimentos foram possíveis e o reduzido número desses experimentos obedeceu a um DCCR. Essa técnica de análise permitiu-nos um bom número de informações a partir desse reduzido número de experimentos, apresentando-nos como excelente ferramenta de pesquisa para fenômenos que demandem poucas possibilidades de repetições na busca de condições otimizadas de operação.

Como continuação desse trabalho, sugerimos a obtenção de pré-moldados conformados a partir de gesso totalmente reciclados e uma maior caracterização do material final através de técnicas mais sofisticadas de análises tais como: Microestrutura do material (MEV), Análise termodiferencial (DTA e DTG), Porosidade e Área superficial (Isotermas de Absorção-Desorção), Espectroscopia de Infravermelho e Difratomia de Raios-X (DRX).

2.5 Referências

- AMORÓS ALBERO, 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 ALBERO, 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12127 (MB 3468). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas do Pó**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12128 (MB 3469). **Gesso para construção - determinação das propriedades físicas da Pasta**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12129 (MB 3470). **Gesso para construção - determinação das propriedades mecânicas**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12130 (MB 3471). **Gesso para construção - Determinação da Água Livre e de Cristalização**. Rio de Janeiro: 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13207. **Gesso para construção civil**. Rio de Janeiro: 1994.
- CAVALCANTI, L. B., **Condições Operacionais de Produção de um Gesso Beta Reciclável**. 2006, 135 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2006.
- CÔRTE REAL, J. C. Determinação de condições operacionais adequadas para produção de pré-moldado de gesso de alta resistência mecânica. Dissertação de Mestrado. 75 pg. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2009.
- FOLLNER, S.; WOLTER, A.; HELMING, K.; SILBER, C.; BARTELS, H. AND FOLLNER, H. On the Real Structure of Gypsum Crystals. **Cryst. Res. Technol.** Volume 37, N. 2-3, 2002a, Pages 207-218.
- FOLLNER, S.; WOLTER, A.; PREUSSER, A.; INDRIS, S.; SILBER, C. AND FOLLNER, H. The Setting Behaviour of α - and β -CaSO₄ × 0,5 H₂O as a Function of Crystal Structure and Morphology. **Cryst. Res. Technol.** Volume 37, N. 10, 2002b, Pages 1075-1087.
- MONÇÃO JÚNIOR, A. R. **Otimização das condições experimentais na desidratação do minério de gipsita para obtenção de um gesso beta reciclável**. 2007, 98 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2007.
- PERES, L. S.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. Gesso: produção e utilização na construção civil. Recife: Editora SEBRAE, 2008. 116 p.

APÊNDICE

Apêndice A

A Legislação brasileira relacionada com o Gesso é propostas por 13 normas técnicas dadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, descritas abaixo:

1. **ABNT NBR 14715-1:2010:** Chapas de gesso para forros/divisórias do tipo *drywall*. Parte 1: Requisitos. especifica os requisitos para as chapas de gesso para *drywall* destinadas à execução de paredes, forros e revestimentos internos não estruturais.
2. **ABNT NBR 14715-2:2010:** Chapas de gesso para *drywall*. Parte 2: Métodos de Ensaio. Estabelece os procedimentos laboratoriais para a determinação das características geométricas e físicas, e os métodos de ensaio que devem ser aplicados para ensaiar as chapas de gesso para *drywall*, a fim de verificar o seu atendimento à ABNT NBR 14715-1.
3. **ABNT NBR 15758-1:2009:** Sistemas construtivos em chapas de gesso para *drywall* - Projeto e procedimentos executivos para montagem Parte 1: Requisitos para sistemas usados como paredes. Estabelece as diretrizes para projeto e seleção de sistemas construtivos de paredes em chapas de gesso para *drywall*, os procedimentos executivos para montagem e instalação e as verificações para o recebimento dos serviços.
4. **ABNT NBR 15758-2:2009:** Sistemas construtivos em chapas de gesso para *drywall* - Projeto e procedimentos executivos para montagem Parte 2: Requisitos para sistemas usados como forros. Estabelece as diretrizes para projeto e seleção de sistemas de forros em chapas de gesso para *drywall*, os procedimentos executivos para montagem e instalação, e as verificações para o recebimento dos serviços.
5. **ABNT NBR 15758-3:2009:** Sistemas construtivos em chapas de gesso para *drywall* - Projeto e procedimentos executivos para montagem Parte 3: Requisitos para sistemas usados como revestimentos. Esta parte da ABNT NBR 15758 estabelece as diretrizes para projeto, seleção, procedimentos de montagem e verificações para o recebimento dos sistemas de revestimentos com chapas de gesso para *drywall*.
6. **ABNT NBR 15217:2009:** Perfis de aço para sistemas construtivos em chapas de gesso para "*drywall*" - Requisitos e métodos de ensaio. Esta Norma estabelece os requisitos e métodos de ensaio para os perfis de aço utilizados nos sistemas construtivos em chapas

de gesso para "drywall", destinados a montagens de paredes, forros e revestimentos internos não estruturais.

7. **ABNT NBR 13867:1997:** Revestimento interno de paredes e tetos com pasta de gesso - Materiais, preparo, aplicação e acabamento. Esta Norma fixa as condições exigíveis quanto aos materiais, preparo, aplicação e acabamento de revestimentos internos de paredes e tetos com pasta de gesso.
8. **ABNT NBR 13207:1994:** Gesso para construção civil – Especificação. Gesso para construção civil – Especificação.
9. **ABNT NBR 12775:1992:** Placas lisas de gesso para forro - Determinação das dimensões e propriedades físicas - Método de ensaio. Placas lisas de gesso para forro - Determinação das dimensões e propriedades físicas - Método de ensaio.
10. **ABNT NBR 12127:1991:** Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas do pó - Método de ensaio. Esta Norma prescreve o método para determinação das propriedades físicas do gesso na forma de pó.
11. **ABNT NBR 12128:1991:** Gesso para construção - Determinação das propriedades físicas da pasta - Método de ensaio. Esta Norma prescreve o método para execução dos ensaios físicos da pasta de gesso, compreendendo as determinações.
12. **ABNT NBR 12129:1991:** Gesso para construção - Determinação das propriedades mecânicas - Método de ensaio. Esta Norma prescreve o método para determinação das propriedades mecânicas do gesso para construção.
13. **ABNT NBR 12130:1991:** Gesso para construção - Determinação da água livre e de cristalização e teores de óxido de cálcio e anidrido sulfúrico - Método de ensaio. Esta Norma prescreve o método para determinação da água livre, água de cristalização e teores de cálcio e anidrido sulfúrico.