

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

P

P

E

Q



Estudo Teórico-experimental da Desidratação da
Gipsita para Obtenção de um Gesso Beta Reciclável

Mestranda: DANIELE DE CASTRO PESSOA DE MELO

*Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.*

PPEQ - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química
Cidade Universitária- Recife – PE
CEP. 50740-521
Telefax: 0-xx-81- 2126-7289

Recife
Abril / 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MESTRADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Estudo Teórico-experimental da Desidratação da Gipsita para Obtenção de um Gesso Beta Reciclável

Dissertação apresentada ao Mestrado de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, Orientada pelo Prof. Dr. Mohand Benachour e Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos.

RECIFE, ABRIL DE 2008.

M528e **Melo, Daniele de Castro Pessoa de.**
Estudo Teórico-experimental da Desidratação da Gipsita para
Obtenção de um Gesso Beta Reciclável / Daniele de Castro Pessoa de
Melo. - Recife: O Autor, 2008.
82 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2008.

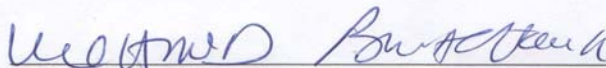
Inclui Bibliografia e Anexos.


1. Engenharia Química. 2. Gipsita. 3. Gesso Beta. 4. Desidratação
Térmica. 5. Parâmetros Cinéticos. I. Título.


UFPE

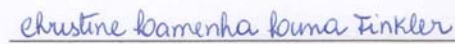
660.2 **CDD (22. ed.)** **BCTG/2008-205**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 03 de abril de 2008 a Banca
Examinadora constituída pelos professores:


Prof.Dr. Mohand Benachour
Departamento de Engenharia Química da UFPE


Prof.Dr. Luiz Stragevitch
Departamento de Engenharia Química da UFPE


Prof.Dr. Valdemir Alexandre dos Santos
Departamento de Química da UNICAP


Profa.Dra. Christine Lamenha Luna-Finkler
Departamento de Química da UNICAP

DEDICATÓRIA

Toda Honra e toda Glória seja dada ao Senhor JESUS. Dedico esta dissertação de Mestrado ao meu esposo Alexandre Camillo pelo carinho, paciência e por sempre me apoiar nas horas mais difíceis, ele sem dúvida é o presente que Deus preparou aqui na Terra para mim; aos meus pais pela dedicação e incentivo a minha formação pessoal, acadêmica e profissional, com valorosos conselhos, que me levaram sempre a decisões coerentes e acertadas.

AGRADECIMENTOS

Ao se concluir um projeto de vida como este, tão importante como realizações pessoais e profissionais, é necessário agradecer àquelas pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram, participaram ou incentivaram o desenvolvimento e a elaboração deste trabalho.

Desta forma, expresso aqui os meus sinceros agradecimentos, não existindo ordem de importância das pessoas, por que todos somaram de alguma maneira nos diversos momentos ao longo destes meses, para organizar os agradecimentos, seguirei a ordem acadêmica, profissional e pessoal.

Aos meus Orientadores: Prof. Valdemir Alexandre que além de orientador tornou-se amigo, me incentivando com paciência nos momentos de dúvidas e incertezas, durante todo o tempo, através de uma orientação competente e o Prof. Mohand Benachour pela confiança e reconhecimento do meu trabalho desde o início, me apoiando em toda a etapa dessa pesquisa.

A Professora Eliane Cardoso, sempre disponível no auxílio nas atividades compartilhando sua experiência.

A Universidade Católica de Pernambuco pelo espaço cedido para a realização dos experimentos, bem como os laboratoristas do Departamento de Química.

Aos amigos do mestrado pela amizade, companheirismo, ajuda, em tantas conversas, trabalhos em conjunto e momentos inesquecíveis durante o curso; àqueles que prosseguem ou dão início aos seus trabalhos.

Aos meus irmãos Cláudio e Emanuele, pelo apoio em todos os sentidos. Aos meus sobrinhos, Caio, Ana Carla e Isabela, por tantas alegrias em meio à exaustão e que de uma certa forma aliviaram o meu desejo maior de ser mãe e a minha tia Conceição que de uma forma especial esteve sempre comigo.

RESUMO

São determinados parâmetros cinéticos em condições operacionais otimizadas de reação de desidratação térmica do minério de gipsita produzindo um tipo de gesso beta reciclável, garantindo-se propriedades mecânicas superiores as do gesso beta convencional por um mínimo de três ciclos de vida. De acordo com a resolução do CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, o resíduo de gesso oriundo da construção civil tornou-se um rejeito de difícil descarte, uma vez que esse material é considerado como contaminante para os demais componentes de um entulho. Além de se ressaltar que não foi ainda desenvolvida uma tecnologia para a sua reciclagem. Com auxílio de um reator batelada em escala laboratorial, produz-se gesso beta a partir do minério de gipsita com granulometria adequada de modo a se ter predominância do regime reacional químico, e sob pressão manométrica e temperatura controladas. Esse excedente de pressão é obtido restando-se parte do vapor de água produzido com a desidratação do próprio minério de gipsita, por meio da retenção do mesmo no reator com uso de uma válvula do tipo alívio. Os resultados obtidos a partir de planejamento fatorial do tipo 2^3 , com ponto central, foram interpretados com auxílio da técnica de análise das superfícies de resposta. A região do ótimo foi identificada como a de uma pressão manométrica em torno de 0,6 atmosferas manométricas e de uma temperatura próxima de 170 °C.

Palavras-chave: Gipsita, Gesso Beta, Desidratação térmica, Ciclo de vida, Parâmetros Cinéticos.

ABSTRACT

Kinetic parameters are determined in operational conditions, optimized by reaction in thermal dehydration of the crude gypsum mineral; it is producing a type of recycling beta plaster, improving mechanical properties of the conventional beta plaster for a minimum of three cycles of life. In accordance with the resolution of the CONAMA n° 307, of 05 of July of 2002, the deriving plaster residue of the civil construction became one rejects of difficult discarding, a time that this material is considered as contaminant for the excessively component ones of a rubbish. Beyond of this, the standing out of its recycling technology still was not developed. Working in a batch reactor in laboratorial scale, beta plaster is produced from the crude gypsum mineral with adequate granulometry in order to have predominance of the chemical rational governor, and under controlled gauge pressure and temperature. This excess of pressure is gotten holding back part of the water vapor produced with the dehydration of the proper crude gypsum ore, by retention manner of former way in the reactor, with use of a valve it type relief. The results gotten from factorial planning of type 2^3 , with central point, they had been interpreted with aid of the technique of analysis of the reply surfaces. The region of the excellent one was identified as of a gauge pressure around 0,6 manometric atmospheres and of 170 a temperature next to °C.

Key-word: Gypsum, Gypsum plaster, Thermal dehydration, Life cycle, Kinetic parameters.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRAT.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	12
LISTA DE TABELAS	121
1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Preliminares.....	16
2.2 Empregos Atuais do Gesso e da Gipsita	17
2.3 Classificação dos Resíduos Sólidos	18
2.4 Reciclagem e Reutilização	187
2.5 Gesso Reciclado	189
2.6 Análise Cinética das Decomposições Térmicas	23
2.6.1 Estágios da reação.....	23
2.6.2 Conceitos de velocidade e energia de ativação	25
2.6.3 Métodos não-mecanísticos.....	26
2.6.4 Métodos mecanísticos	31
2.7 Planejamento e Análise de Experimentos.....	35
3. MATERIAIS E METÓDOS	37
3.1 Preparação das Amostras.....	37
3.2 Descrição Geral do Forno	38
3.3 Quantificação da Conversão da Gipsita em Gesso	41
3.5 Caracterização dos Corpos de Prova	44
3.5.1 Análise da microestrutura do gesso.....	44
3.5.2 Avaliação da dureza (D)	45
3.5.3 Quantificação da massa unitária (MU).....	46
3.5.4 Determinação de módulo de resistência à flexão (RF)	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Determinação das Condições Granulométricas Predominantes na Etapa Química	50

4.2 Análise de Variância (ANOVA) das Características D, UM e RF do Gesso Produzido..	51
4.3 Modelagem Cinética da Desidratação de Gipsita em Condições Otimizadas.....	50
5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	66
5.1 Conclusões	66
5.2. Sugetões para Trabalhos Futuros	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
ANEXOS.....	77

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 – Moinho de disco	36
Figura 3.2 – Peneiras com agitação.....	37
Figura 3.3 – Reator utilizado no arranjo experimental para produção de gesso beta.....	38
Figura 3.4 – Bandejas utilizadas no interior do forno batelada	39
Figura 3.5 – Estufa com controle digital de temperatura.....	39
Figura 3.6 – Analisador de umidade por técnica de radiação por infravermelho	40
Figura 3.7 – Tela inicial do software PQA.....	41
Figura 3.8 – Tipo de Classificação e composição química do hemidrato.	42
Figura 3.9 – Microscópio eletrônico de varredura modelo: <i>JSM 5600 LV JEOL</i>	44
Figura 3.10 – Durômetro.....	45
Figura 3.11 – Aparelho para determinação da Massa Unitária (MU).....	46
Figura 3.12 – Esquema adotado pelo método para medir a resistência à flexão de uma barra	48
Figura 4.1 – Evolução da conversão da gipsita em gesso <i>versus</i> diâmetro médio inicial	49
Figura 4.2 – Micrografia dos cristais de gesso formulados em condições favoráveis.....	50
Figura 4.3 – Micrografia dos cristais de gesso obtidos sem controle de temperatura e pressão.....	51
Figura 4.4 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da dureza (D).....	52
Figura 4.5 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da massa unitária (MU).....	52
Figura 4.6 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da resistência à flexão (RF).....	53
Figura 4.7 – Superfície de Resposta: dureza.....	54
Figura 4.8 – Superfície de Resposta: massa unitária.....	54
Figura 4.9 – Superfície de Resposta: resistência à flexão.....	55
Figura 4.10 – Curvas de nível: dureza.....	55
Figura 4.11 – Curvas de nível: massa unitária.....	56
Figura 4.12 – Curvas de nível: resistência à flexão.....	56
Figura 4.13 – Comparação entre valores simulados e experimentais: dureza.....	57
Figura 4.14 – Comparação entre valores simulados e experimentais: massa unitária.....	57
Figura 4.15 – Comparação entre valores simulados e experimentais: resistência à flexão.....	58
Figura 4.16 – Equação de 1ª ordem.....	59
Figura 4.17 – Avanço da interface Bidimensional	59
Figura 4.18 – Difusão unidimensional	60
Figura 4.19 – Avanço da interface Tridimensional.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Expressões matemáticas comumente usadas para $f(\alpha)$	33
Tabela 3.1 - Níveis para o planejamento fatorial adotado.....	43
Tabela 4.1 - Parâmetros dos ajustes por regressão não linear.....	64

1 INTRODUÇÃO

O minério de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) da região do Araripe, matéria-prima para a fabricação de gesso, é considerado entre os de melhor qualidade no mundo, apresentando um teor de sulfato de cálcio dihidratado que varia de 88% a 98% de pureza (BALTAR et al., 2004). O Brasil possui também a maior reserva mundial de gipsita, com aproximadamente 1,2 bilhão de toneladas; sendo que isto agrega inevitavelmente uma grande responsabilidade tanto social quanto ambiental (BERNSTEIN, 1996).

Vinte e seis empresas mineradoras, 72 calcinadoras e 234 fábricas de pré-moldados compõem a estrutura do Pólo Gesseiro do Araripe - PGA, situado nos municípios pernambucanos de Araripina, Trindade, Ipubí, Ouricuri e Bodocó. Este Pólo gera mais de 12 mil empregos diretos e 60 mil indiretos, tornando Pernambuco o estado nordestino com maior destaque nesse setor, produzindo 90% do gesso consumido no País (CAVALCANTI, 2006).

O Pólo Gesseiro do Araripe surgiu na década de 60 do século passado com as atividades de mineração de gipsita realizadas, na época, por pequenas e médias empresas. Na década seguinte, os trabalhos das indústrias voltaram-se para a calcinação, o que representou uma grande mudança, sendo esta proporcionada por financiamentos importantes da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) que possibilitou a utilização de novas tecnologias e a contratação de técnicos estrangeiros para o local (BASTOS e BALTAR, 2003).

O beneficiamento da gipsita para a produção de gesso por desidratação térmica envolve as seguintes operações básicas: (1) britagem; (2) rebritagem; (3) peneiramento (usado apenas em algumas empresas); (4) encilhamento; (5) calcinação; (6) estabilização térmica em silos; (7) moagem (de acordo com as especificações de mercado para o produto); (8) encilhamento e (9) ensacamento (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2001). Entre tais etapas, aquela considerada como a mais crítica é a de calcinação, responsável direta pelo tipo de gesso produzido, podendo resultar em um produto de baixa qualidade, ou um produto capaz de atender aos mais rígidos critérios, inclusive com características de um material reciclável, permitindo que o gesso possa ser reclassificado e ocupe posição de destaque entre os materiais de construção civil mais utilizados (CAVALCANTI, 2006).

O gesso é o produto da desidratação térmica da gipsita e de sua posterior moagem. A temperaturas relativamente baixas (150°C - 170°C), a gipsita perde parte de sua água de composição resultando no semi-hidrato $\left(\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}\right)$ (FOLLNER et al., 2002).

O gesso produzido pode ser classificado em gesso beta ou gesso alfa. Obtém-se industrialmente o semi-hidrato beta, ou gesso beta, desidratando-se parcialmente o minério de gipsita a pressões próximas à pressão atmosférica (SANTOS, 1996). O semi-hidrato alfa, ou gesso alfa, por sua vez, é produzido desidratando-se o minério de gipsita em uma suspensão aquosa ácida ou em presença de eletrólitos (FOLLNER et al., 2002). Essas formas de obtenção conferem aos respectivos gessos importantes características. Um fator determinante para a produção de uma dessas duas formas, alfa ou beta, na prática, tem sido o custo, pois o gesso alfa é sensivelmente mais caro que o beta.

O processo de hidratação do gesso deve resultar em um produto com composição exatamente igual a que o originou a gipsita (SANTOS; VASCONCELOS; PINTO, 1997). A reciclagem de resíduos de gesso como aglomerante demanda, além da moagem, a remoção de impurezas, como o papel, e uma calcinação em condições adequadas. Segundo a experiência internacional atual, é possível reciclar inclusive o gesso acartonado que contém outros compostos, produzindo aglomerantes, desde que sejam removidos contaminantes incorporados no processo de geração de resíduos (TANIGUTI, 2000).

O sucesso de um processo de produção de um gesso susceptível de reciclagem está diretamente relacionado às condições operacionais que originaram o semi-hidrato inicial. Gessos provenientes de processos produtivos a pressões muito próximas da atmosférica são materiais frágeis (cristais esfacelados pela saída brusca da água), provavelmente não serão obtidos gessos de qualidade caso sejam submetidos a uma nova desidratação ou reciclagem, para um novo ciclo de vida.

A Resolução 307/02 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) enquadra o gesso como material de classe C, ou seja, resíduos, sobras da construção civil, para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações tecnicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação. Com o aprimoramento de um método de reciclagem para o gesso beta, o resíduo de gesso passará a ser reutilizado em vez de atulhar os lixões e aterros sanitários, proporcionando no mesmo tempo a criação de empresas e empregos a partir de

indústrias de reciclagem do gesso. Essas empresas poderão ser instaladas bem próximas aos grandes centros urbanos, considerando a redução do custo de transporte da matéria-prima original (resíduos de gesso), em vez de minério de gipsita; sendo este último disponível em abundância somente no Pólo Gesseiro do Araripe situado a 680 km de Recife-PE.

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo desenvolver estratégias teórico-experimentais para a obtenção de um modelo cinético que possa servir de base para um processo de produção de gesso beta em condições adequadas à reciclagem desse material. Os parâmetros cinéticos do modelo de desidratação da gipsita, em condições operacionais otimizadas, são estabelecidos com auxílio da condução do processo produtivo em reator descontínuo e em escala laboratorial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Preliminares

A produção de rejeito na construção civil é algo inevitável que pode ser amenizado com a reciclagem. A geração de entulho passa por todo um processo, que vai desde a obtenção da matéria prima, passando pela indústria, transporte, construção, demolição e reutilização, onde em cada etapa deste ciclo é gerado resíduo. O entulho gerado é de responsabilidade de todos que participam do processo, tendo limitações, envolvendo custos, grande desprendimento de energia e desenvolvimento tecnológico (JOHN, 2000).

Embora a redução na geração de resíduo seja necessária, é importante considerar a heterogeneidade dos resíduos, em que parte do processo foi obtido e qual o local de aplicação, para que se possa fazer um diagnóstico do rejeito e dar-lhe a aplicação ideal.

A Europa gera cerca de 600 a 918 kg/hab/ano de resíduos da construção e demolição (RCD) e o Brasil entre 230 a 760 kg/hab/ano. Estes dados são entre 40% e 70% maiores do que o lixo urbano gerado no mesmo período de tempo (PINTO, 1997).

As perdas na construção são significativas, estima-se que a perda típica do desperdício do gesso na construção civil é de 45%, enquanto os fabricantes de gesso em pó estimam perdas em torno de 30% da massa de gesso (AGOPYAN, 1998). Na região da grande São Paulo, estima-se um consumo de gesso para revestimento de aproximadamente 20.000 toneladas/mês, parte das perdas permanece na parede como excesso de espessura e será incorporada aos resíduos de construção quando da demolição do edifício.

Nos países desenvolvidos, onde as atividades de renovação de edificações, infraestrutura e espaços urbanos são mais intensas, os volumes de resíduos provenientes de demolições são muito mais importantes; segundo dados da European Demolition Association (E.D.A.).

A disponibilidade de dados no Brasil é para construções residenciais em edifícios, havendo carência de informação em outras tipologias de construção, tais como: reformas, construções industriais, obras viárias, demolição, e até mesmo nos próprios processos produtivos de pré-moldados (PINTO, 1999).

2.2 Empregos Atuais do Gesso e da Gipsita

O gesso, como material de construção, é utilizado para execução de revestimentos, em blocos e painéis de vedação, forros, e como elemento de decoração nas construções. O gesso não é combustível e resiste ao fogo por longo tempo (RIBEIRO, 2006). Gesso e gipsita são componentes fundamentais em muitos produtos além da construção civil, como, por exemplo:

- **Fabricação de cimento *Portland*** - Na fabricação de cimento *Portland*, a gipsita é adicionada ao *clinker*, na proporção de 3 a 5 % em peso, com a finalidade de controlar o tempo de pega.
- **Na medicina:** Os gessos ortopédicos e odontológicos são utilizados largamente na imobilização, como próteses temporárias, produção de modelos para usos ortodônticos e na confecção de próteses.
- **Na Indústria cerâmica:** O gesso cerâmico é usado especialmente na produção de moldes nos processos de colagem na indústria de louças sanitárias. A durabilidade dos moldes de gesso associada ao seu custo de produção tem contribuído para a competitividade desse produto no mercado.
- **Na agricultura:** O gesso agrícola, que consiste no minério gipsita moído, é utilizado na agricultura para a dessalinização de solos, como fonte de cálcio e de enxofre.
- **Na indústria farmacêutica:** O gesso é usado como ingrediente em vários produtos como, por exemplo, pasta de dente.
- **Nas indústrias de plásticos e papel:** O gesso pode ser utilizado como carga.
- **Na construção civil:** O gesso pode ser usado para revestimento de paredes e teto, construção de paredes divisórias sob formas de blocos ou de painéis acartonados, móveis, piso autonivelante, decoração de ambientes.

2.3 Classificação dos Resíduos Sólidos

A Resolução CONAMA nº 307 de 05 de julho de 2002 dispõe sobre gestão dos resíduos da construção civil. A partir de janeiro de 2005 entrou em vigor a lei de responsabilidade do resíduo gerado pela construção civil, onde se classifica os resíduos de construção e demolição em:

- Classe A – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis na cadeia produtiva da construção civil, tais como: construção, demolição, reformas e reparos de e (Tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto, etc.);
- Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações; (Plásticos, papel, vidro madeira, etc.);
- Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações tecnicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/ recuperação, (gesso);
- Classe D – são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção (Tintas, solventes, óleos).

Na resolução do CONAMA apresentada anteriormente, o uso das competências que lhe foram conferidas pela Lei nº. 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº. 99.274, de 6 de julho de 1990, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, Anexo à Portaria nº. 326, de 15 de dezembro de 1994, considera a política urbana de pleno desenvolvimento da função social da cidade e da propriedade urbana, conforme disposto na Lei nº. 10.257, de 10 de julho de 2001 (CONAMA, 2002). Essa resolução tem o objetivo da efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil, determinando os responsáveis pela geração e estabelecendo os procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos.

2.4 Reciclagem e Reutilização

O reaproveitamento de resíduos para uso em construção é praticado desde a Grécia antiga e Império Romano. Há relatos de uso de restos de telhas, tijolos e utensílios de cerâmica como agregado graúdo em concretos rudimentares (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2001).

Entretanto, foram as grandes catástrofes do século passado, como terremotos e guerras, que impulsionaram a prática da reciclagem em locais com grandes volumes de resíduos,

carência e urgência de construções e infra-estrutura. Durante e após Segunda Guerra Mundial, foram reciclados aproximadamente 115 milhões de m³ de resíduos de construção e demolição na Alemanha, os quais foram utilizados na construção de aproximadamente 175 mil unidades habitacionais (DE PAW, 1994).

Nas últimas décadas, principalmente por razões ambientais e econômicas, vários países vêm adotando a reciclagem, realizada por empresas de diversos segmentos (LIMA, 1999). Outros motivos contribuíram para a recuperação dos resíduos, principalmente nessas últimas décadas: exploração exagerada de jazidas de agregados, disposição dos resíduos sem tratamento, a geração de um volume maior de entulho do que a construção de estradas pode absorver e sobrecarga de aterros. Estes aterros representam uma forma de desperdício de recursos, sendo necessário a sua diminuição para evitar: o aumento dos custos de aterramento e a possibilidade de lixiviação de elementos danosos ao meio ambiente, procurando estabelecer critérios, indicando como utilizar os materiais de construção e os entulhos gerados por uma obra, na própria obra (GRIGOLI, 2000). Neste contexto, cabe ressaltar a citação de ZORDAN (1997) que afirma: *Os estudos de soluções práticas que apontem para a reutilização do entulho na própria construção civil contribuíam para amenizar o problema urbano dos depósitos clandestinos deste material, proporcionando melhorias do ponto de vista ambiental e introduzindo no mercado um novo material com grande potencialidade de uso.*

Existem algumas alternativas para amenizar o aumento da geração de entulhos, tais como (LEITÃO, 2004):

- Recolhimento e separação - Através de acordos com as empresas que recolhem entulho de obras, estes serão descarregados em Bacias de Captação, onde serão separados e organizados para destinação específica, garantindo seu reaproveitamento. Estes acordos incluem benefícios pecuniários ou incentivos fiscais a serem estudados.

- Utilização do entulho de obras - Dos exemplos pode-se citar o uso como aglomerado moído para assentamentos e argamassas, execução de contra-pisos de conjuntos habitacionais, em fundações, pilares e vigas de baixa solicitação, enchimentos de caixões perdidos, regularização de vias, preenchimento de buracos, contra-piso de passeios públicos, drenos de escoamento de água de chuva, aterramento de valetas, entre outras soluções que apenas contribuiriam com a diminuição dos gastos das entidades públicas ou privadas em parceria.

- Planejamento e movimento da bacia - A cidade deve ser vista a partir de um estudo urbanístico que, holisticamente, determine pontos estratégicos para a implantação das bacias e seu trajeto, considerando, principalmente, seus aspectos geográficos, como o relevo e a hidrografia, que são, em última análise, a sua verdadeira identidade. A intervenção, de pontual e estática, torna-se, assim, dinâmica, transformando a cidade através de sua passagem, podendo ocorrer de forma mais rápida ou mais lenta, dependendo da conjuntura específica, mas que, uma vez implantada, segue inexoravelmente.

- Atuação conjunta e cooperada – Compartilha-se tudo, passado, presente e futuro, necessidades e anseios, sobrevivem-se neste universo, que é único, e assim como se faz parte do todo, o todo também faz parte de cada um. A cidade é quem nela habita, pois sem o homem é apenas ruína, fantasma (JOHN, 2000).

Alguns benefícios gerados pela reciclagem na construção civil consistam principalmente na redução:

- No consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados;
- De áreas necessárias para aterro, pela minimização de volume de resíduos gerados pela reciclagem;
- Do consumo de energia durante o processo de produção, e;
- Da poluição.

2.5 Gesso Reciclado

A heterogeneidade do entulho reciclado talvez seja a maior dificuldade do ponto de vista produtivo. Isso acontece, pois a composição do entulho pode variar nas obras novas de acordo com a etapa em que se encontra a obra. Por exemplo, o entulho conterá maior teor de material cerâmico durante a execução da alvenaria (com bloco cerâmico) ou de argamassa na fase de revestimentos (SOUZA 1999; JOHN, 2000).

No Brasil, a principal ênfase comercial na reciclagem desse entulho, até agora, foi à instalação de máquinas argamassadeiras, em canteiros de obras, para triturar os seus próprios

resíduos minerais das obras. Esse método de produção de argamassas, apesar de aparentemente poder trazer benefícios econômicos às construtoras, apresenta problemas por falta de planejamento e de conhecimento do assunto por parte dos engenheiros. Em muitos casos, os canteiros de obras não dispõem de espaço suficiente para instalação da máquina e armazenamento do entulho, que varia com o tamanho da obra. Não existe uma gestão racional do resíduo gerado que reduza, ao mínimo, os gastos com reciclagem e evite a contaminação do entulho a ser reciclado por materiais indesejáveis (aço, gesso, plástico, madeira e outros que possam inviabilizar a reciclagem). Para agravar, são poucos os engenheiros que têm domínio do processo de moagem, do comportamento dos materiais reciclados e da sua influência nas propriedades dos produtos resultantes da reciclagem (PINTO, 1999).

A incorporação de resíduos na produção de materiais também pode reduzir o consumo de energia, tanto porque estes produtos freqüentemente incorporam grande quantidade de energia quanto porque podem reduzir as distâncias de transporte de matérias primas. No caso das escórias e pozolanas, é este nível de energia que permite produção de cimentos sem a calcinação da matéria prima, permitindo uma redução do consumo energético de até 80% (JOHN, 1999). Finalmente, a incorporação de resíduos no processo produtivo muitas vezes permite a redução da poluição gerada. Por exemplo, a incorporação de escórias e pozolanas reduz substancialmente a produção de CO₂ no processo de produção do cimento.

A incorporação de resíduos permite muitas vezes a produção de materiais com melhores características técnicas. Este é o caso da adição de micros sílica, que viabiliza concretos de alta resistência mecânica e da escória de alto forno, que melhora o desempenho do concreto frente à corrosão por cloretos. Dessa forma, a reutilização de resíduos de gesso, tanto da própria fabricação de pré-moldados (placas, blocos e acartonados) como das construções e demolição de obras em pré-moldados é uma ação imperativa para elevar os níveis de utilização do gesso na indústria da Construção Civil. Além disso, o incentivo à reciclagem deve ser encorajado como uma importante etapa de qualquer política ambiental (JOHN, 1999).

A reciclagem, por outro lado, é uma oportunidade de transformação de uma fonte importante de despesas em uma fonte de faturamento ou, pelo menos, de redução das despesas de deposição. Uma grande siderúrgica, por exemplo, produz mais de um milhão de toneladas

de escória de alto forno por ano que valem no mercado cerca de 10 milhões de reais, sem contar a eliminação das despesas com o gerenciamento do resíduo. Contrariamente à disposição controlada dos resíduos, a reciclagem é atrativa às empresas. Para qualquer forma de reutilização dos resíduos da construção civil é necessário projetar em cima de indicadores, menor consumo de energia, menos geração de resíduos, poluição e analisar o ciclo de vida (ALVES, 2004).

Existem publicações com ensaios de resultados sobre formas de reutilização para diversos segmentos, tais como: corretivo para solo, aditivo para compostagem, forração para animais, absorvente de óleo, controle de odores em estábulos, secagem de lodo de esgoto e papel (MAVIN, 2000; CIWMB, 2007).

Uma forma já consolidada de reutilização em países desenvolvidos é a matéria-prima para gesso acartonado, onde as perdas na construção são significativas, devido às atividades de corte. Elas dependem muito da modulação da obra. Nos Estados-Unidos da América, estima-se que entre 10 a 12 % do gesso acartonado é transformado em resíduos durante a construção (CAMPBELL, 2007).

Um caso de sucesso é o da empresa canadense *New West Gypsum Recycling* que desde 1986 recicla placas de gesso acartonado. A empresa dispõe de um equipamento móvel que pode ser transportado para diferentes localizações. A tecnologia, no entanto, requer limpeza manual do resíduo e proteção da chuva, para que o material seja reutilizado como aglomerante na produção de gesso acartonado.

As argamassas de gesso reutilizadas foram obtidas dos resíduos de revestimentos secando e triturando o material (CAVALHO, 2003). Com base da observação experimental dos gesseiros, sabe-se que no entulho encontra-se muitas vezes certa quantidade de água, tornando o resíduo saturado e impedindo novas reações de hidratação.

O resíduo de gesso é submetido à secagem em estufa até a constância de massa. Posteriormente, ele é triturado com um soquete até serem destruídos todos os torrões. A avaliação da trabalhabilidade é obtida empiricamente pelo gesseiro. O resíduo triturado é submetido ao teste de comparação com pó de gesso *in natura*, sendo produzida uma pasta com gesso reciclado e outra com o gesso *in natura*.

O interessante deste produto reutilizado é que com uma quantidade menor de água torna-se possível arrematar uma placa. No entanto, com a mesma quantidade de água o gesso

reciclado não endurece e quando comprimido libera água. A granulometria do gesso reciclado é bem maior que a do gesso *in natura*. Esta é a causa da possível dificuldade de trabalhar com o resíduo, devido ao aspecto grosseiro e da pega lenta; sendo possível a sua utilização apenas em arremates de placas.

CARVALHO (2003) produziu tijolos de gesso com os resíduos de uma produção de 5 dias em uma indústria de forros e molduras. Foi armazenado o resíduo produzido por um único fundidor. Durante a moldagem das sancas, placas e molduras sobram uma quantidade de gesso preparado, que antes do final da pega pode ser reaproveitado. Este resíduo é depositado em uma forma para a fabricação de tijolos, o gesso em estado fresco é nivelado e depois de aproximadamente dois minutos é retirado da forma e armazenado ao ar livre.

Os tijolos de gesso não deformam com o passar do tempo. São mais leves, podendo ser uma carga menor para estrutura de uma edificação e o ensaio a compressão deu acima do normalizado para tijolos maciços segundo a norma NBR 7170/83, sendo a idade fator determinante para o teste, a resistência foi obtida após 60 dias (FOLLNER et al., 2002).

Empresas de países do primeiro mundo afirmam utilizar até 22% de gesso reciclado sem qualquer prejuízo no desempenho, sendo uma tecnologia já comprovada no mercado externo. Todavia, há necessidade de uma limpeza dos resíduos, inclusive o próprio papel do gesso acartonado, depois uma moagem e uma calcinação à baixa temperatura. Além de ser uma tecnologia onerosa, precisa-se também de uma mão-de-obra para limpeza do produto (ALVES, 2004).

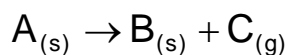
Estes modelos de reutilização são válidos para os entulhos homogêneos das indústrias gesseiras, já que o resíduo é oriundo da sobra da moldagem, correm poucos riscos de serem contaminados por agentes físicos. No caso de entulho contaminado por agentes físicos existe a necessidade de usinas de reciclagem (JOHN, 1999).

2.6 Análise Cinética das Decomposições Térmicas

2.6.1 Estágios da reação

O estudo de reações no estado sólido é um desafio, uma vez que as estruturas dos sólidos são extremamente complexas e dão origem a uma grande variedade de mecanismos reacionais também complexos. A cinética dessas reações relaciona-se com a velocidade de transformação dos reagentes em produtos e o mecanismo dessa transformação (BOLDYREV, 1993).

Dentro de uma grande quantidade de processos químicos envolvendo reagentes sólidos, um grupo pode ser distinguido por envolver reações especiais, os processos de decomposição térmica do tipo:



em que certas substâncias sólidas são transformadas em outras substâncias sólidas com desprendimento de gases. Esses processos são geralmente de decomposições de substâncias cristalinas ou materiais minerais e são utilizados para obtenção de produtos gasosos de alto interesse comercial (SZEKELY, 1976).

Após a moagem, o gesso é obtido através da desidratação térmica da gipsita em temperaturas relativamente baixas (150°C - 170°C), onde a gipsita perde parte de sua água de composição resultando no semi-hidrato:



O gesso produzido da desidratação térmica da gipsita pode ser classificado em gesso beta ou gesso alfa. Obtém-se industrialmente o semi-hidrato beta, ou gesso beta, desidratando-se parcialmente o minério de gipsita a pressões próximas à pressão atmosférica (SANTOS, 1996).

O semi-hidrato alfa, ou gesso alfa, por sua vez, é produzido desidratando-se o minério de gipsita em uma suspensão aquosa ácida ou em presença de eletrólitos (FOLLNER et al., 2002). Essas formas de obtenção conferem aos respectivos gessos importantes características. Um fator determinante da opção para a produção de uma dessas duas formas, alfa ou beta, na prática, tem sido o custo, pois o gesso alfa é sensivelmente mais caro que o beta.

A investigação dos estágios da decomposição térmica de um sólido inclui as seguintes etapas (DAREN, 1972):

- i) determinação do intervalo de temperatura na qual cada estágio de decomposição ocorre;
- ii) isolamento e identificação de todos os produtos intermediários da decomposição, em etapas correspondentes ao aumento de temperatura e;
- iii) identificação dos produtos finais do processo estudado.

As medidas de conversão da gipsita em gesso, ou semi-hidrato, realizadas nos estágios selecionados, são feitas por métodos termogravimétricos e sob condições isobáricas e isotérmicas. Ainda, segundo o referido autor, com base no conhecimento das faixas de temperatura de todos os estágios da dissociação do composto, recomenda-se que as medidas sejam realizadas sob pressões reduzidas para impedir qualquer processo reversível, ou sob pressão dos produtos gasosos da reação, de modo a permitir que se identifique a influência de determinadas pressões parciais sobre o processo de decomposição.

2.6.2 Conceitos de velocidade e energia de ativação

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

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (2.1)$$

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

Para as reações no estado sólido os conceitos de concentração e de ordem de reação não têm significados. A velocidade de reação é definida como variação da espessura da camada do produto formado com o tempo, ou variação do peso desta camada, ou do número de

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

2.6.3 Métodos não-mecanísticos

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

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(t) \cdot f(\alpha) \quad (2.2)$$

com a primeira função, $k(T)$, depende da temperatura e a segunda função, $f(\alpha)$, depende da composição da amostra, sendo α a conversão do reagente reacional sólido. Para muitas reações, a dependência da temperatura pode ser descrita pela equação de Arrhenius (Equação 2.1), a equação (2.2), se torna: na forma final seguinte:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \cdot f(\alpha) \quad (2.3)$$

Existem então duas formas de aproximações para a solução da equação (2.3): a aproximação por métodos não-mecanísticos e a que leva em conta o mecanismo da reação (WENDLANDT, 1986).

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

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (2.4)$$

sendo n a ordem da reação de cinética homogênea. Contudo, nas reações em estado sólido, o parâmetro n possui apenas significado empírico. Substituindo-se a equação (2.4) na (2.3), teremos:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp(-E/RT)(1 - \alpha)^n \quad (2.5)$$

e a cinética da reação pode ser descrita de acordo com os três parâmetros básicos da equação (2.5), isto é, A , E e n .

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

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1 - \alpha)^n \quad (2.6)$$

Neste caso, para um valor correto de n , o gráfico de $(d\alpha/dt)$ em função de $(1 - \alpha)^n$ dará uma linha reta com inclinação igual a k . Contudo, o método utilizado pelo referido autor na avaliação dessa tangente era pouco preciso, tendo o mesmo, por isso, recomendado a integração da equação (2.6). Após um rearranjo conveniente, obtemos então:

$$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{(1 - n)} = kt \quad (2.7)$$

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

$$-\ln(1 - \alpha) = kt \quad (2.8)$$

O lado esquerdo da equação (2.7) é convenientemente chamado de $g(\alpha)$. Assim, um gráfico $g(\alpha)$ em função de t , dará uma linha reta com inclinação igual a k . O gráfico poderá ser construído para vários valores de n , escolhendo-se como o mais indicado aquele que proporcionou o melhor ajuste. As constantes de velocidade são obtidas a diferentes temperaturas e do gráfico de $\ln(k)$ em função de $1/T$, estima-se E e A .

Um conhecimento a priori da forma aproximada de $g(\alpha)$ ou do valor de n é requerido. Propõem-se a utilização de métodos matemáticos numéricos iterativos na obtenção de valores aproximados de n ou $g(\alpha)$ (NINAN, 1989). Para isso, o referido autor sugere a combinação das equações (2.1) e (2.7), de onde se obtém:

$$g(\alpha) = kt = A \exp(-E / RT)t \quad (2.9)$$

ou

$$\ln(t) = \ln g(\alpha) - \ln A + \frac{E}{RT} \quad (2.10)$$

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

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

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{A}{\phi} \exp(-E / RT) f(\alpha) dT \quad (2.11)$$

E todos os métodos para obtenção dos parâmetros cinéticos a partir da equação (2.11) se enquadram, como método diferencial ou integral (HOROWITZ, 1963).

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

$$-\frac{dx}{dt} = A \exp(-E/RT) x^n \quad (2.12)$$

Logaritmando e diferenciando convenientemente a equação (2.12), chegaremos a:

$$\frac{Edt}{RT^2} = d \ln \left(-\frac{dx}{dt} \right) - n d \ln(x) \quad (2.13)$$

A integração dessa equação dá então:

$$-\frac{E}{R} \Delta \left(\frac{1}{T} \right) = \Delta \ln \left(-\frac{dx}{dt} \right) - n \Delta \ln(x) \quad (2.14)$$

Dividindo as equações (2.13) e (2.14) por $d \ln(x)$ e $\Delta \ln(x)$, respectivamente, teremos;

$$\frac{EdT}{RT^2} \frac{1}{d \ln(x)} = \frac{d \ln(-dx/dt)}{d \ln(x)} - n \quad (2.15)$$

e

$$-\frac{(E/RT)}{\Delta \ln(x)} \Delta \left(\frac{1}{T} \right) = \frac{\Delta \ln(-dx/dt)}{\Delta \ln(x)} - n \quad (2.16)$$

Os gráficos das equações (2.15) e (2.16), correlacionando $d \ln(-dx/dt)/d \ln(x)$ em função de $dT/[T^2 d \ln(x)]$ e $\Delta \ln(-dx/dt)/\Delta \ln(x)$ em função de $\Delta(1/T)/\Delta \ln(x)$, respectivamente, produzirá uma linha reta com inclinação igual a $-(E/R)$, interceptando a ordenada em n .

As aproximações por métodos integrais são também baseadas na equação (2.11), a qual pode ser rescrita na formar:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \left(\frac{A}{\phi} \right) \exp(-E/RT) dT \quad (2.17)$$

Integrando a equação (2.17) temos,

$$F(\alpha) = \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \left(\frac{A}{\phi} \right) \int_{T_0}^T \exp(-E/RT) dT \quad (2.18)$$

Um método para solução da equação (2.18), denominado de método de integração da exponencial (ABOU-SHAABAN, 1978), baseia-se na escolha arbitrária de $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$. A aproximação é feita com integração do lado direito da equação (2.18) auxiliada pela substituição de $\mu = E/RT$ e o uso da aproximação do tipo:

$$\int_{\mu}^{\alpha} e^{-\mu} \mu^{-b} d\mu = \mu^{(1-b)} e^{-\mu} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (b)^n}{\mu^{n+1}} \quad (2.19)$$

para obter a equação:

$$\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{1-n} = \frac{ART^2}{\phi E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) e^{-E/RT} \quad (2.20)$$

Logaritmando a equação (2.20), teremos:

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2 (1 - n)} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\phi E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (2.21)$$

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

2.6.4 Métodos mecanísticos

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

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

$$f(\alpha) = D_1(\alpha) = \alpha^2 = \left(\frac{k}{x^2} \right) t \quad (2.22)$$

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

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

$$f(\alpha) = D_2(\alpha) = (1 - \alpha) \ln(1 - \alpha) + \alpha = \left(\frac{k}{r^2} \right) t \quad (2.23)$$

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

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

$$f(\alpha) = D_3(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/2} \right]^2 = \left(\frac{k}{r^2} \right) t \quad (2.24)$$

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

$$f(\alpha) = D_4(\alpha) = \left(1 - \frac{2\alpha}{3} \right) - (1 - \alpha)^{2/3} = \left(\frac{k}{r^2} \right) t \quad (2.25)$$

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

$$f(\alpha) = R_2(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/2} \right] = \left(\frac{u}{r} \right) t \quad (2.26)$$

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

$$f(\alpha) = R_3(\alpha) = \left[1 - (1 - \alpha)^{1/3} \right] = \left(\frac{u}{r} \right) t \quad (2.27)$$

Por conveniência analítica, a equação (2.6) tem sido aplicada na análise de reações do estado sólido. Para certos valores de n , a forma integrada dessa equação leva a alguns resultados particulares de interesse. Quando $n = 1/2$, chega-se à equação (2.26), enquanto que se $n = 2/3$, obtêm-se a equação (2.27).

Algumas reações no estado sólido parecem seguir o comportamento cinético de uma reação de primeira ordem, isto é, $n = 1$. A forma integrada da equação (2.6) passa então a ser:

$$f(\alpha) = \ln(1 - \alpha) = -kt \quad (2.28)$$

Valores de n diferentes de $1/2$, $2/3$ e 1 , levam a equação (2.6) para formas sem nenhum significado físico.

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

$$f(\alpha) = A_2(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{1/2} = kt \quad (2.29)$$

e

$$f(\alpha) = A_3(\alpha) = [-\ln(1 - \alpha)]^{1/3} = kt \quad (2.30)$$

respectivamente.

A Tabela 2.1 resume as formas mais comumente utilizadas para $f(\alpha)$ (SHARP, 1966):

Tabela 2.1 - Expressões matemáticas comumente usadas para $f(\alpha)$

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

Fonte: Santos (1990)

2.7 Planejamento e Análise de Experimentos

O planejamento fatorial é classificado como um método do tipo simultâneo, onde as variáveis independentes, de interesse, que apresentam influências significativas para a variável dependente, ou de resposta, são avaliadas ao mesmo tempo (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2002). Para realizar um planejamento fatorial, escolhem-se as variáveis a serem estudadas e efetuam-se experimentos em diferentes valores destes fatores. De um modo geral, o planejamento fatorial pode ser representado por b^a , em que “a” é o número de fatores e b é o número de níveis escolhidos.

Em geral os planejamentos fatoriais do tipo 2^a são os mais comuns. Um dos aspectos favoráveis deste tipo de planejamento é a realização de poucos experimentos. É óbvio que com um número reduzido de níveis não é possível explorar de maneira completa uma grande região no espaço das variáveis. Entretanto, podemos observar tendências importantes para a realização de investigações posteriores. Podem-se ter planejamentos fatoriais em que seja interessante explorar uma ou mais variáveis com um número de níveis diferente das demais. Desta forma a representação do fatorial passa a ser, por exemplo, $A_1^a \cdot A_2^b \cdot A_3^c$, isto é, A_1 , A_2 e A_3 são níveis para as variáveis a, b, e c, respectivamente.

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

Após a realização dos experimentos de triagem, os fatores significativos são selecionados e uma metodologia de análise de superfícies de respostas (MYERS;

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

3. MATERIAL E METÓDOS

3.1 Preparação das Amostras

A gipsita foi obtida do Pólo Gesseiro do Araripe, através da empresa Supergesso Indústria e Comércio Ltda., distrito industrial de Araripina – Pernambuco, segundo padrões industriais de extração, granulometria, armazenamento e transporte.

O minério de gipsita foi triturado através do moinho de disco (Figura 3.1) e a análise granulométrica foi realizada passando-se o material triturado através de peneiras de diferentes aberturas que são padronizadas internacionalmente (Figura 3.2). Cada peneira tem um número de aberturas por polegada linear denominado “mesh”. Logo, quanto maior o “mesh”, maior o número de aberturas e, conseqüentemente, mais fino deverá ser o grão para que passe por ela. Utilizaram-se peneiras com “mesh” de 04, 09, 14, 28, 35, 48 e 65, obtendo assim sete amostras com diferentes granulometrias. Para o peneiramento utilizou-se uma rotação de 40 rpm por 30 minutos, após vários testes preliminares visando-se o estabelecimento de condições adequadas.

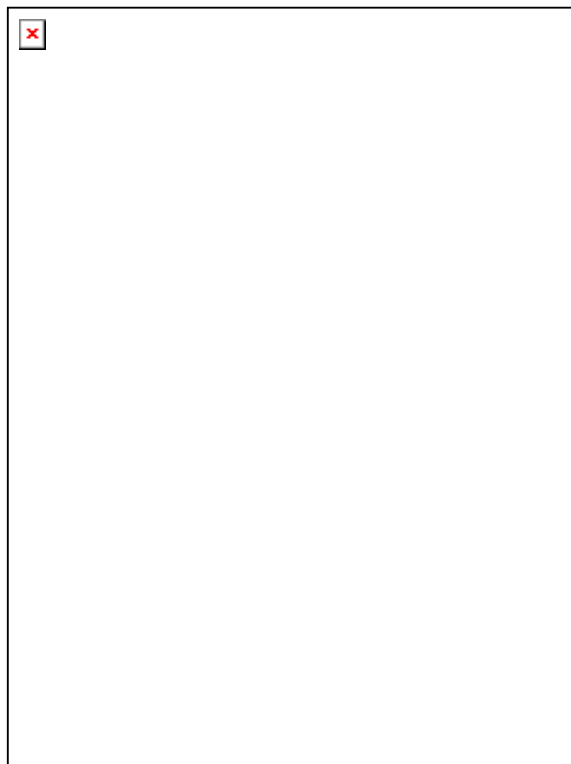


Figura 3.1 - Moinho de disco.



Figura 3.2 – Peneiras com agitação.

3.2 Descrição Geral do Forno

O forno do tipo autoclave para conversão da gipsita em gesso foi confeccionado em chapa de cobre de três milímetros de espessura e tem formato cilíndrico. A extremidade superior do forno, em escala de laboratório, tem tampas de formatos parabólicos (Figura 3.3). A solda entre o corpo e a base do forno é do tipo amarela para se trabalhar com temperaturas de até 500°C. A pressão no interior do forno é mantida com a retenção de parte do vapor de água produzido na própria reação, com auxílio de uma válvula de alívio calibrada para descarga automática do vapor excedente. O aquecimento do forno é realizado colocando-se o mesmo no interior de uma estufa com controle digital de temperatura. A temperatura da estufa é mantida constante para que os valores possibilitem a manutenção de uma temperatura de 200°C no interior do forno (Figura 3.5).



Figura 3.3 – Reator utilizado no arranjo experimental para produção de gesso beta sob pressão acima da pressão atmosférica.

O procedimento experimental consiste em distribuir o material a ser desidratado em sete bandejas com capacidade para 0,1 kg cada uma, formando leitos de sólidos compactados com 0,005 m de altura. As bandejas são confeccionadas em alumínio (Figura 3.4). Tais bandejas são arrumadas no interior do reator, uma acima da outra, com auxílio de espaçadores em arame de aço de 0,0014 m de diâmetro para permitir a saída do vapor de água de cada bandeja. O conjunto de reator tipo autoclave e bandejas são então fechado hermeticamente, só liberando vapor por uma válvula de alívio. Segue-se então o aquecimento do conjunto obtido inserindo-o em uma estufa com controle digital de temperatura (Figura 3.5).



Figura 3.4 - Bandejas utilizadas no forno tipo autoclave.



Figura 3.5 - Estufa com controle digital de temperatura utilizado como fonte de calor para reação de desidratação térmica que ocorre no forno

Após a reação, a conversão da reação no interior do forno é determinada com auxílio do teor da água de desidratação do material retirado do mesmo. Para isso utiliza-se uma balança térmica que usa a técnica de infravermelho modelo **GEHAKA IV 200** (Figura 3.6).



Figura 3.6 - Analisador de umidade por técnica de radiação por infravermelho

3.3 Quantificação da Conversão da Gipsita em Gesso

O software PQA (Plaster Quality Analisador), envolvendo a elaboração de um programa computacional em linguagem Matlab (apresentado no anexo 01), desenvolvido por Santos (1999), foi usado para quantificar a conversão da gipsita em gesso. A sua aplicação se torna possível somente com o fornecimento das informações sobre a composição química da

gipsita utilizada, o teor da água combinada da mesma e o teor da água combinada do produto obtido com a reação de desidratação, conforme o procedimento exemplificado na (Figura 3.7).

Plaster Quality - Analisador

Arquivo Calcular Relatorio Acessorios Ajuda

Nome:

Data: 28/07/2001

Analista:

N.Lote:

Assume Valores p/GIPSITA: ☐ Sim ☒ Nao

Amostra de Gesso: Agua Combinada 000,0000

Valores p/GIPSITA [%]	[%] Erro
SO ₃	0,0
CaO	0,0
Agua Combinada	0,0
MgO	0,0
CO ₂	0,0

LBS - INFORMATICA 5/ 5 Informe o Nome do Fornecedor 13:22

Figura 3.7- Tela inicial do Software PQA.

O método de análise para determinação da água combinada é bastante simples o que facilita muito o trabalho de determinação da conversão da gipsita. Com a utilização do software PQA é possível determinar quanto foi formado de hemidrato e a composição química do hemidrato formado, além de classificá-lo com BOM, REGULAR ou RUIM (Figura 3.8),



Figura 3.8 – Tipo de Classificação e composição química do hemidrato.

3.4 Planejamento dos Experimentos

O Planejamento Experimental foi feito baseado na busca pela região ótima para a produção de gesso beta reciclável, a etapa preliminar de identificação das variáveis de interesse foi realizada no trabalho de Cavalcanti (2006). Dessa forma, as referidas variáveis foram à pressão manométrica de desidratação e a temperatura associada. Para obtenção de uma melhor definição para a região ótima, o planejamento envolveu três níveis (Tabela 3.1) e um ponto central (KALIL; MAUGERI; RODRIGUES, 2000), para que o ajuste recaísse através de um modelo matemático quadrático:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 \quad (4.1)$$

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

Tabela 3.1 – Níveis para o planejamento fatorial adotado.

Variáveis Independentes	Níveis		
	-1	0	+1
Pressão Manométrica (atm)	0,10	0,50	0,90
Temperatura (°C)	150	170	190

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

3.5 Caracterização dos Corpos de Prova

3.5.1 Análise da microestrutura do gesso

Com intuito de avaliar o tamanho e morfologia dos cristais de gesso formulados, amostras desses foram depositadas sobre uma fita adesiva de carbono fixada em uma porta-amostra. Após sofrer deposição de uma fina camada de ouro, os materiais foram analisados por microscopia eletrônica de varredura empregando-se um aparelho da Jeol modelo *JSM 5600 LV* (Figura 3.9). As micrografias foram obtidas com ampliações variando com fator de ampliação de 3700 vezes. Esta análise foi realizada no Laboratório de Química da Universidade Católica de Pernambuco.



Figura 3.9 – Microscópio eletrônico de varredura modelo: *JSM 5600 LV JEOL*

3.5.2 Avaliação da dureza (D)

Para este ensaio foi utilizado um durômetro *GS709 Shore C (Woltest)* (Figura 3.10), bloco deve estar apoiado em uma superfície plana imprimindo a base de apoio perpendicularmente à face do bloco por 3 segundos, através de um medidor a analógico é dado o resultado em N/mm^2 .

Foram realizadas para cada bloco três medidas por face em locais alternados, sendo este ensaio feito em doze corpos de prova para cada idade de ensaio, sendo um total de 36.

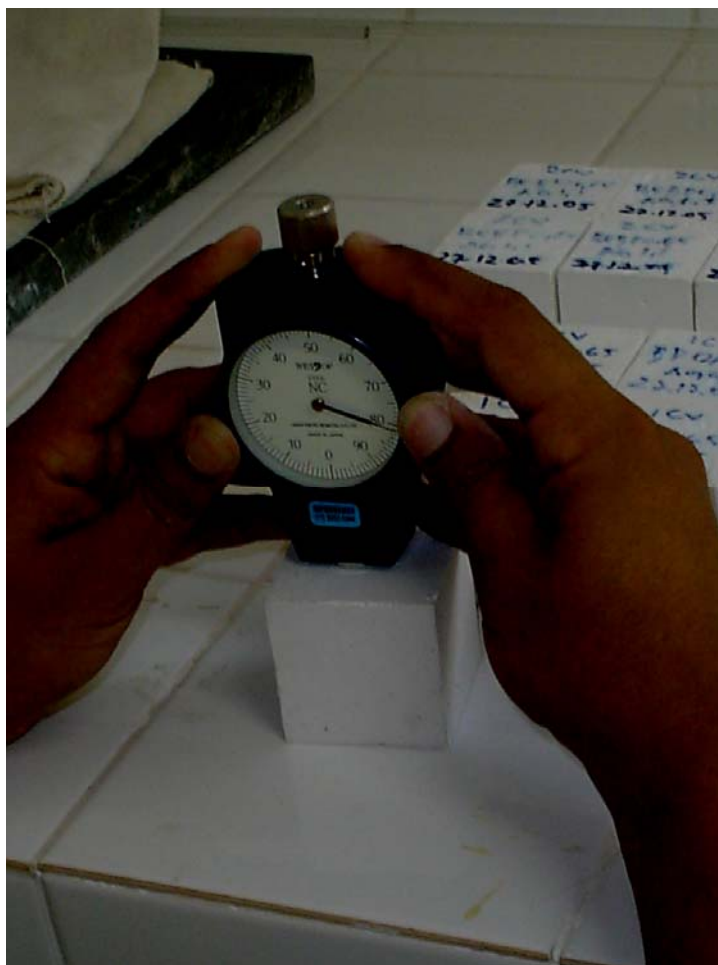


Figura 3.10 - Durômetro.

3.5.3 Quantificação da massa unitária (MU)

Para realização do ensaio de Massa Unitária do gesso na forma de pó foi adotado o procedimento da NBR 12127 e EB – 22.

Utilizou uma quantidade de amostra necessária à determinação das propriedades físicas, passando-a através da peneira de 2,0 mm, com auxílio de um pincel (Figura 3.11).

Os torrões que não foram desfeitos com o pincel, assim como as demais impurezas, retidas na peneira devem ser descartados. Porém, antes, é necessário que sejam pesados e identificados, fazendo constar essas informações no relatório de ensaio.

Tarar o recipiente de medida e colocá-lo sob o funil, centralizando de forma que os eixos verticais coincidam colocar cerca de 0,1 kg de gesso no funil, sobre a peneira, e com a ajuda de uma espátula fazer passar o material.

Com a ajuda de uma espátula é necessário rasar a superfície do recipiente de medida com o cuidado para não compactar o gesso nele contido, e pesar.

O recipiente de medida confeccionado de material não corrosivo e com capacidade de $(1000 \pm 20) \text{ cm}^3$ ou um litro.



Figura 3.11- Aparelho para determinação da massa unitária

Calcula-se a massa unitária aplicando a seguinte equação;

$$Mu = \frac{M}{V} \cdot 1000 \quad (3.4)$$

Em que:

Mu = massa unitária, Kg / m^3

M = massa do gesso, g

V = volume do recipiente, cm³.

Foi considerado o valor médio de cinco determinações como o valor representativo da massa unitária.

3.5.4 Determinação de módulo de resistência à flexão (RF)

A resistência ou tensão de ruptura à flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento, e aplica-se aos materiais rígidos, ou seja, aqueles que não vergam excessivamente sob ação de uma carga. No teste de uma barra de dimensões padrões é apoiada pelas extremidades e no centro (Figura 3.12). A seguir o apoio central aumenta de peso e a força correspondente a uma dada deflexão é aplicada. Se o corpo de prova quebra força de deflexão na ruptura é então a registrada.

A resistência à tração na flexão das pastas foi determinada de acordo com a ISO 3051 (1974), por não existir norma brasileira para este ensaio. Neste ensaio, um carregamento central (P, em kgf) é aplicado ao corpo-de-prova prismático de 10 x 20 x 120 mm, que é posto sobre dois apoios com 100 mm de vão entre eles.

$$R_f = \frac{3PL}{2BH^2} \quad (3.6)$$

R_f = resistência à tração na flexão, MPa

P = Carga de Ruptura, N

L = Distância entre eixos dos Cutelos inferiores, mm

B = Espessura dos corpos de prova, mm

H = Altura dos corpos de prova, mm

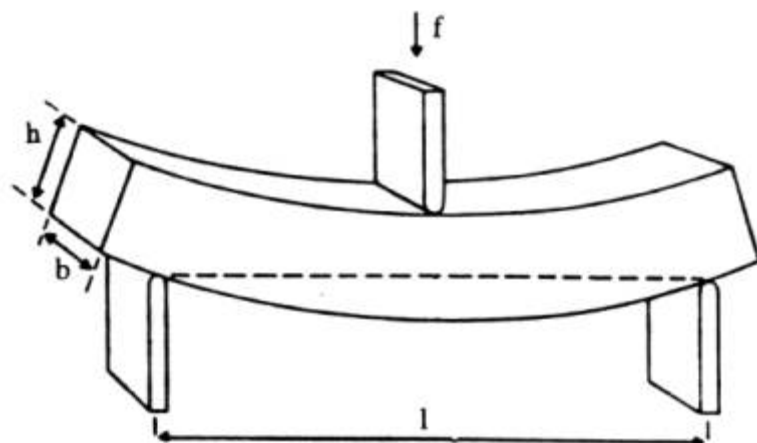


Figura 3.12 - Esquema adotado pelo método para medir a resistência à flexão de uma barra

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação das Condições Granulométricas Predominantes na Etapa Química

Foi realizado o estudo da influência da granulometria na determinação da etapa responsável pela reação. Estes testes foram feitos fixando a temperatura de 170°C e a pressão manométrica de 0,65 atm e diminuindo progressivamente o diâmetro das partículas, para que ocorra a predominância da etapa química e não o regime difusivo.

Todas as análises foram feitas em triplicatas e os valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria estão listados nas Tabelas 1 a 6 do Anexo 2 e ilustrados na Figura 4.1.

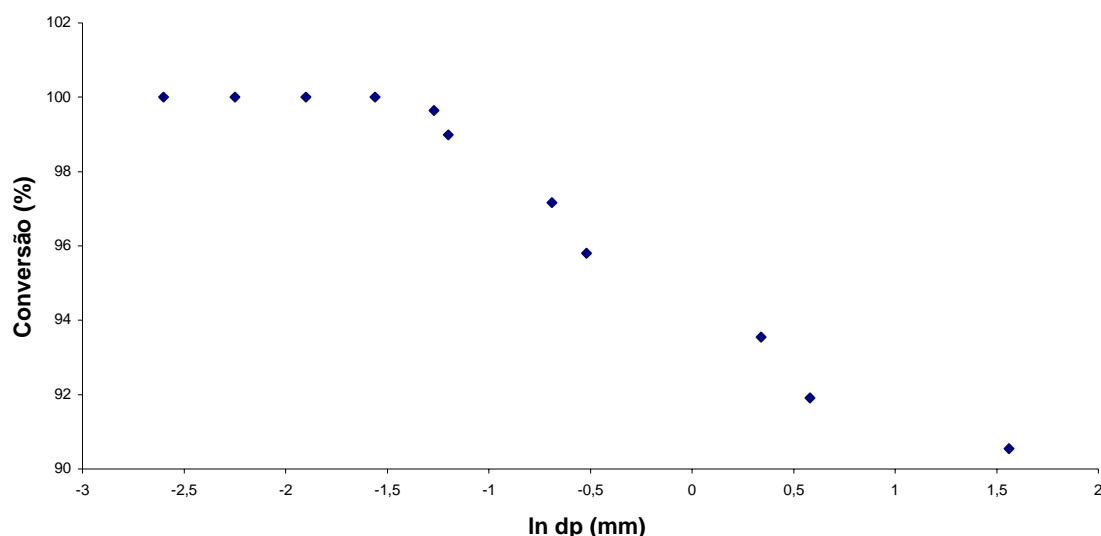


Figura 4.1 – Evolução da conversão da gipsita em gesso *versus* diâmetro médio inicial das partículas de gipsita (T=170°C e P=0,65 atm).

Analisando a Figura 4.1, evidencia-se claramente que a partir de um diâmetro de partículas de gipsita igual ou inferior a 220 μm , a conversão do dihidratado em gesso se torna independente do seu tamanho, caracterizando assim as condições de obtenção do regime químico controlador da velocidade global de desidratação da gipsita. Igualmente, observa-se

com uso da microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliação de 3700 vezes, que os cristais de gesso formulados nas condições favoráveis ao controle de parâmetros operacionais (temperatura $T=170^{\circ}\text{C}$ e pressão manométrica $P=0,65\text{atm}$) apresentaram-se na forma de agulhas e finas, conferindo assim a esse tipo de semi-hidrato um espaço intersticial entre cristais reduzido, com melhoria então da resistência mecânica do material produzido (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Micrografia dos cristais de gesso formulados em condições favoráveis ao controle de parâmetros operacionais ($T=170^{\circ}\text{C}$ e $P=0,65\text{ atm}$)

Já as calcinações conduzidas sem controle dos parâmetros (T e P) responsáveis pela saída da água de hidratação deram origem a um gesso cujos cristais apresentam características morfológicas heterogêneas, sem definição de uma geometria clara, e não possuíam nenhuma semelhança com aquelas encontradas em condições controladas de temperatura e pressão (micrografia da Figura 4.3). Características da forma final dos cristais produzidos não favorecem, nessas condições, altas resistências, sendo estas propriedades muito desejáveis na formulação deste tipo material.

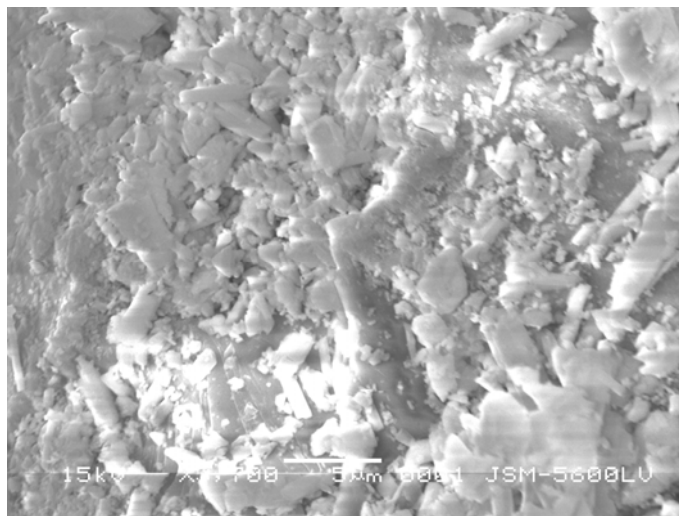


Figura 4.3 – Micrografia dos cristais de gesso obtidos com calcinações conduzidas sem controle da temperatura e da pressão

4.2 Análise de Variância (ANOVA) das Características D, UM e RF do Gesso Produzido.

Como resultados do planejamento fatorial completo do tipo 2^3 , a análise de variância de propriedades relevantes, como dureza (D), massa unitária (MU) e resistência à flexão (RF) para o gesso beta produzido, foram obtidas com os parâmetros da ANOVA (Análise de Variância). Evidencia-se que modelos matemáticos quadráticos ajustam-se perfeitamente à previsão das propriedades relevantes citadas como função da temperatura (T) e pressão manométrica (P), com valores da Constante de Fick (F) e da Probabilidade (p) ($< 0,05$) atestando esses ajustes em todos os casos.

Os modelos matemáticos associados às previsões estatísticas de dureza (D), massa unitária (MU) e resistência à flexão (RF) foram calculados com auxílio das equações 4.1, 4.2 e 4.3:

$$D = 87,1571 + 4,7083 \cdot P + 28,526 \cdot P^2 - 4,2328 \cdot T + 13,3693 \cdot T^2 \quad (4.1)$$

$$MU = 849,5 + 17,2728 \cdot P - 68,3333 \cdot P^2 + 9,3889 \cdot T - 31,0 \cdot T^2 \quad (4.2)$$

$$RF = 4,55301 + 0,050 \cdot P - 0,547619 \cdot P^2 - 0,079 \cdot T - 0,364286 \cdot T^2 \quad (4.3)$$

Diagramas de Pareto também foram construídos para verificação e comprovação de quanto os efeitos envolvidos nos modelos estatísticos eram significativos. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram os diferentes casos. Somente o termo linear de pressão para o modelo da resistência à flexão (RF) encontra-se num valor limiar de validade, coincidindo com a probabilidade de 5,0 % (Figura 4.6).

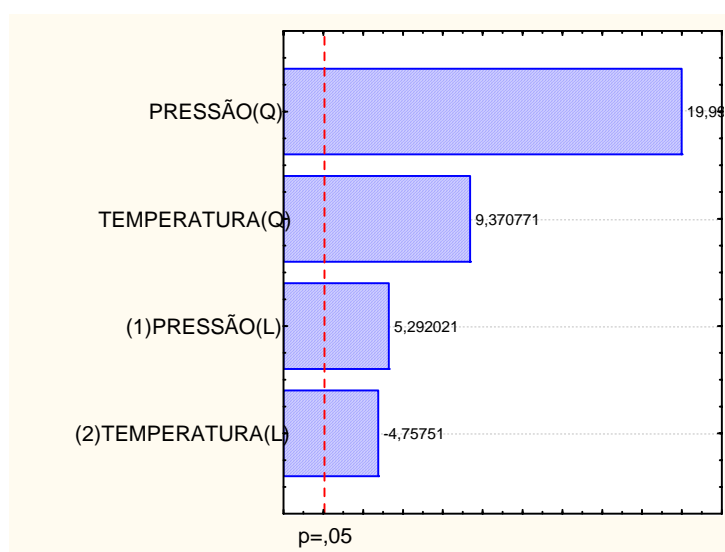


Figura 4.4 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da dureza (D)

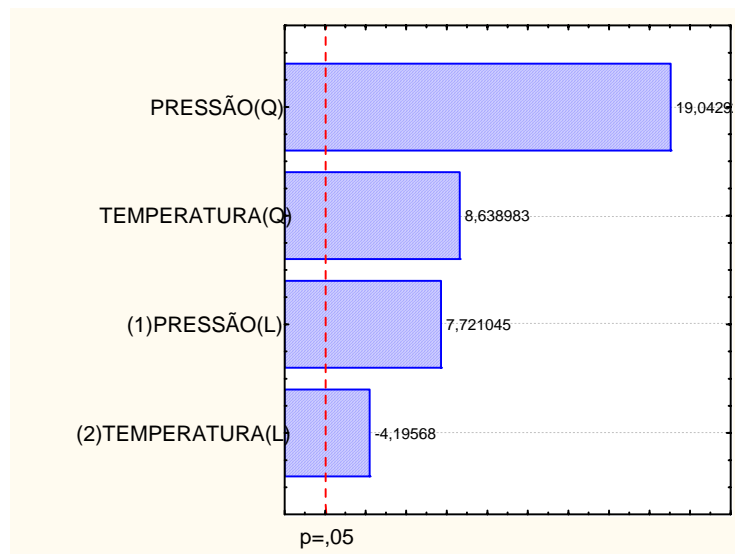


Figura 4.5 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da massa unitária (MU)

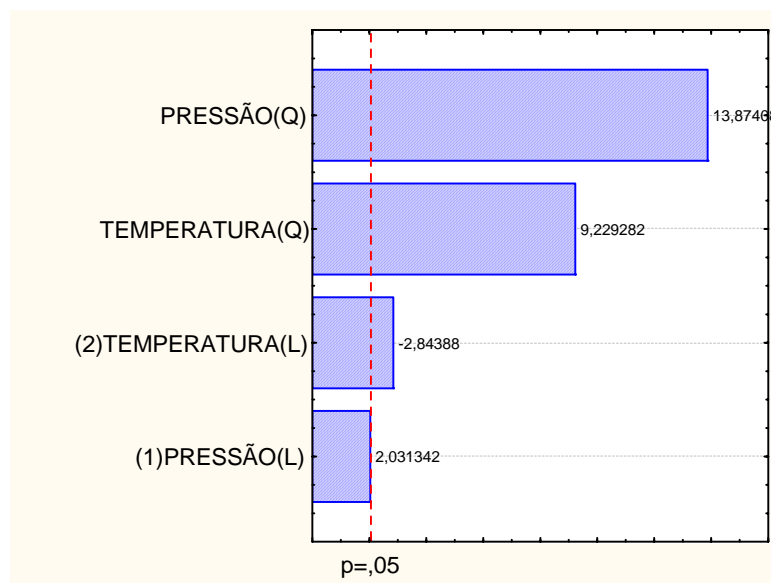


Figura 4.6 – Diagrama de Pareto referente à avaliação da resistência à flexão (RF)

Uma análise das superfícies de respostas também confirma as boas performances dos modelos estatísticos ajustados aos valores experimentais. As regiões de pico das propriedades relevantes podem ser confirmadas em todos os gráficos dessas superfícies (Figuras 4.7, 4.8, 4.9), auxiliadas pelas curvas de contorno (Figuras de 4.10 a 4.12). Estas últimas figuras justificam as ausências dos termos de interações entre as variáveis temperatura e pressão. Em todos os gráficos das curvas de nível os contornos mostraram-se paralelos, evidenciando uma

ausência de interatividades entre esses fatores, ou seja, em qualquer nível de temperatura a pressão atua de modo independente e reciprocamente.

As regiões dos máximos das propriedades investigadas configuraram-se no interior dos gráficos de superfícies de resposta. Essa situação tornou-se possível em virtude da disponibilidade de dados preliminares obtidos no trabalho realizado inicialmente por Cavalcanti (2006), sendo a presente pesquisa apresenta a sua continuidade.

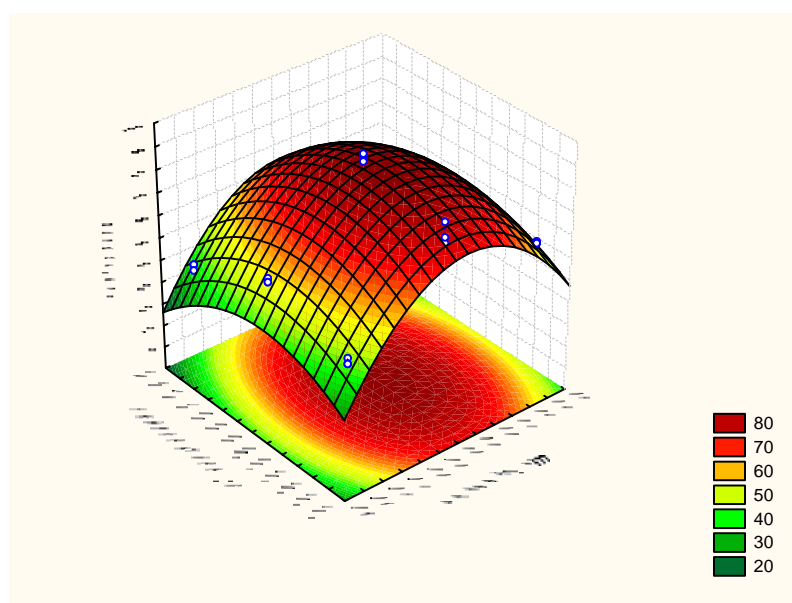


Figura 4.7 – Superfície de resposta referente à quantificação da dureza (D)

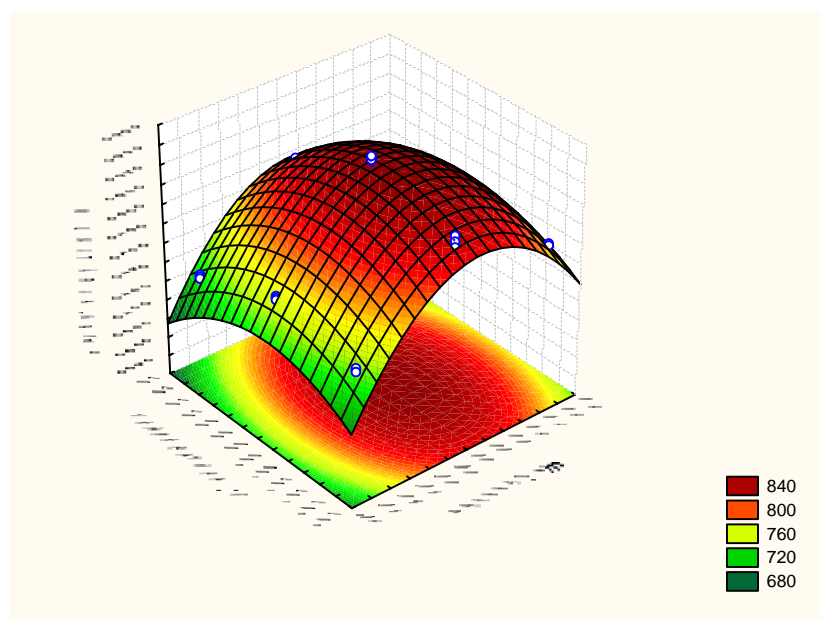


Figura 4.8 – Superfície de resposta referente à massa unitária (MU)

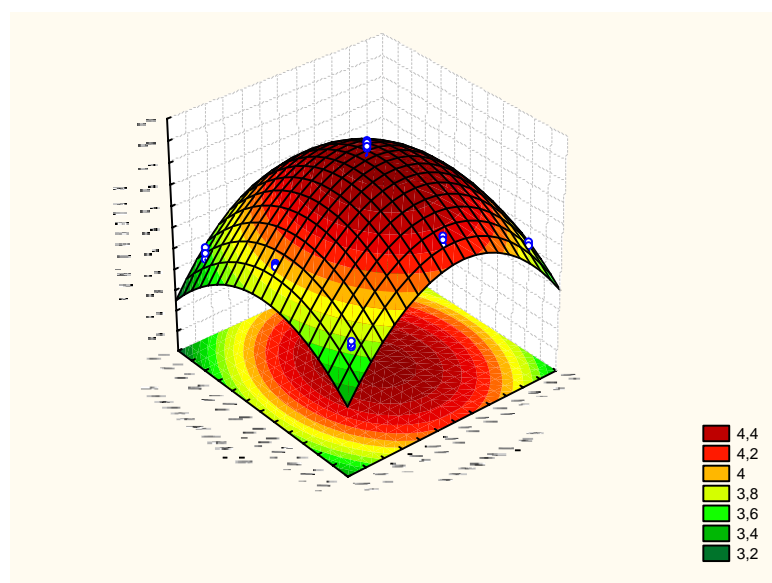


Figura 4.9 – Superfície de resposta referente à resistência à flexão (RF)

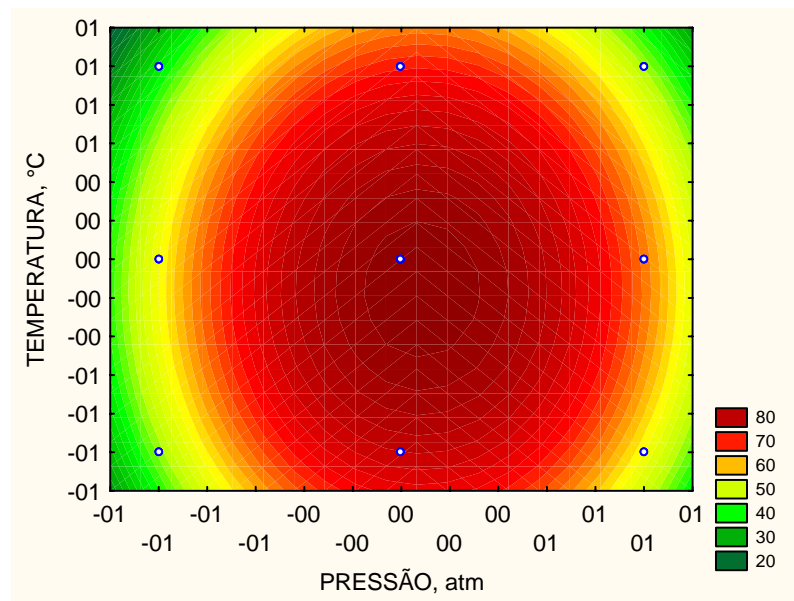


Figura 4.10 – Curvas de nível referente à Dureza (D)

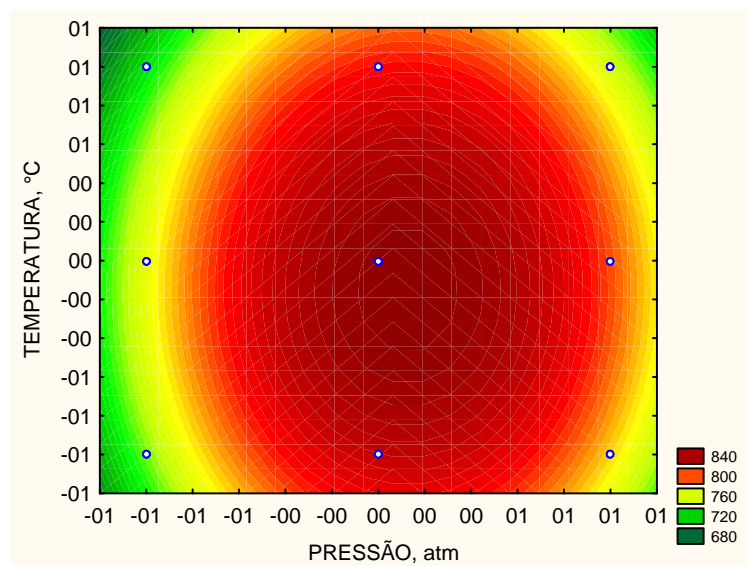


Figura 4.11 – curvas de nível referente à massa unitária (MU)

Para ilustrar o ajuste dos pontos simulados pelos modelos expressos pelas Equações de 4.1 a 4.3 as Figuras de 4.13 a 4.15 mostram gráficos dos valores simulados (linha contínua de cor vermelha) versus valores experimentais (pontos discretos). Nota-se também as boas

precisões dos valores experimentais, associados a uma também considerável exatidão dos mesmos.

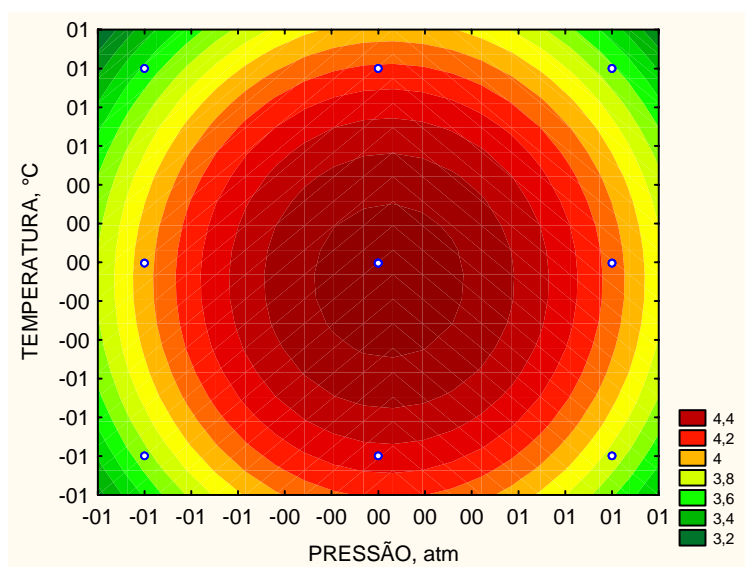


Figura 4.12 – Curvas de nível referente à quantificação à resistência flexão (RF)

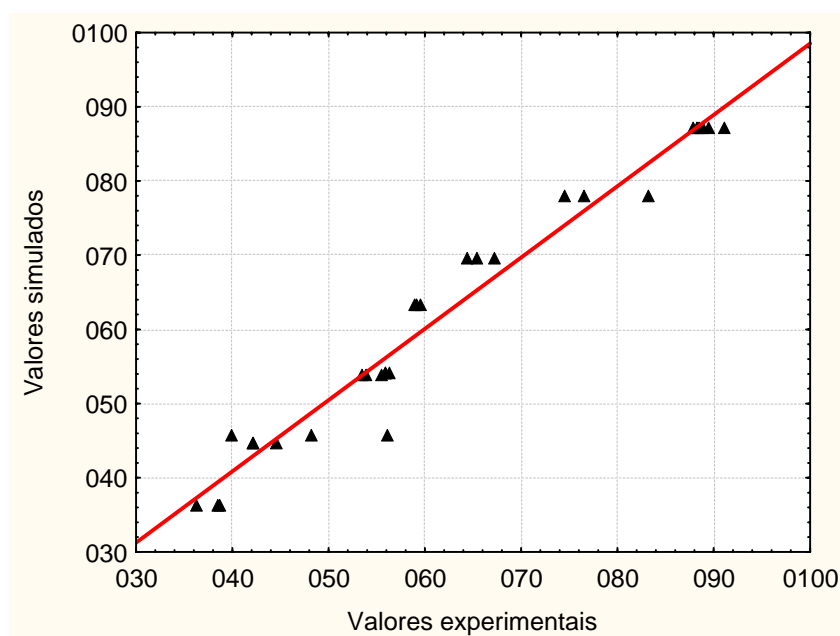


Figura 4.13 – Comparação entre valores simulados e experimentais: Dureza (D)

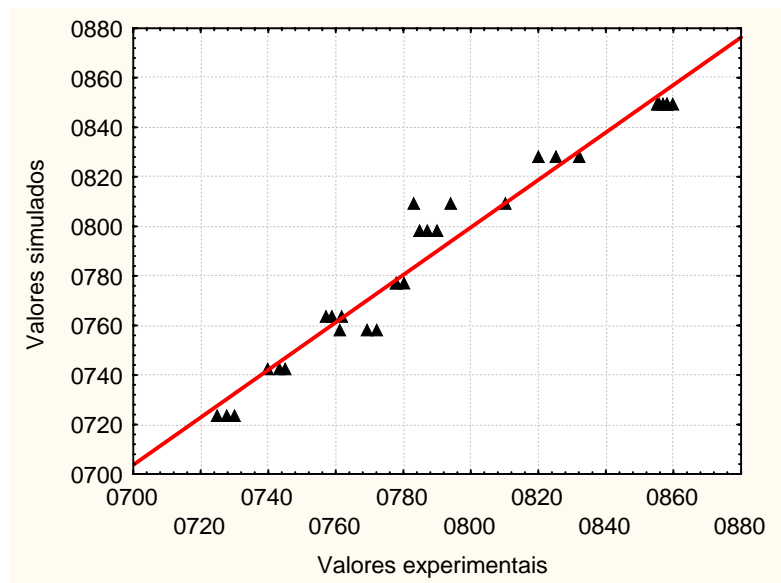


Figura 4.14 – Comparação entre valores simulados e experimentais: massa unitária (MU)

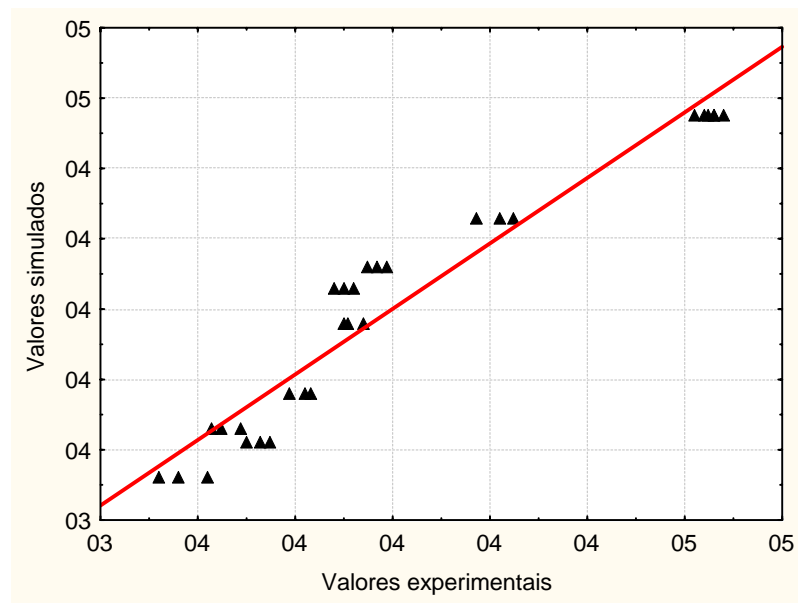


Figura 4.15 – Comparação entre valores simulados e experimentais: resistência à flexão (RF)

4.3 Modelagem Cinética da Desidratação de Gipsita em Condições de (T,P) Otimizadas

A análise cinética foi realizada por meio de ajuste dos modelos aos pontos experimentais. Foram utilizados métodos de regressão não-linear disponibilizados pelo software *Statistica* da StatSoft®. As Figuras de 4.16 a 4.22 ilustram as curvas obtidas no processo de ajuste dos modelos cinéticos propostos para identificação dos mecanismos cinéticos da desidratação térmica da gipsita. Observa-se que os modelos matemáticos relativos aos mecanismos de avanço das interfaces bi- e tridimensional são os que mais se ajustaram aos dados experimentais. A Tabela 4.1 apresenta um resumo das condições de ajuste e dos valores do parâmetro cinético k , relativos a cada modelo.

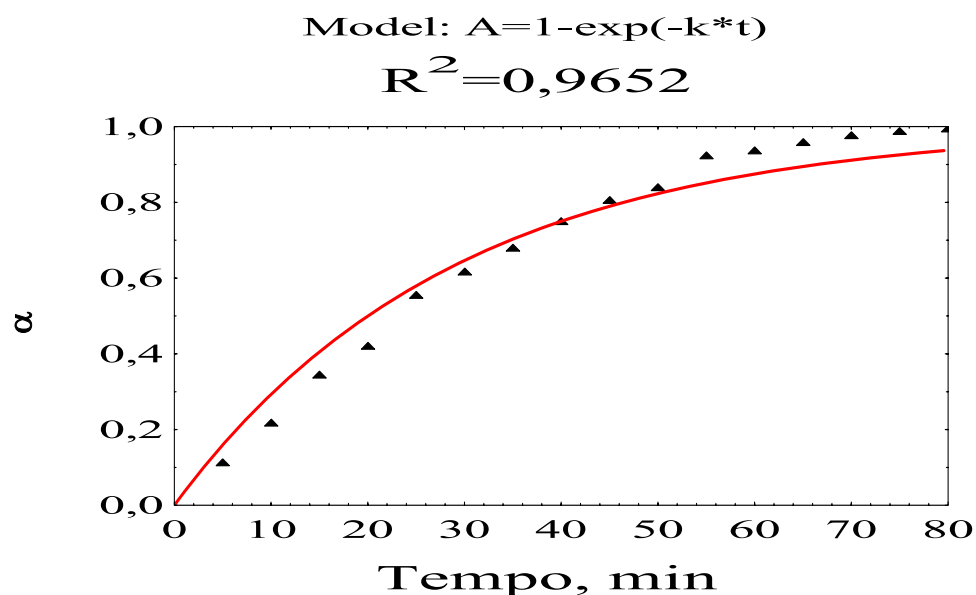


Figura 4.16 – Equação de 1ª ordem

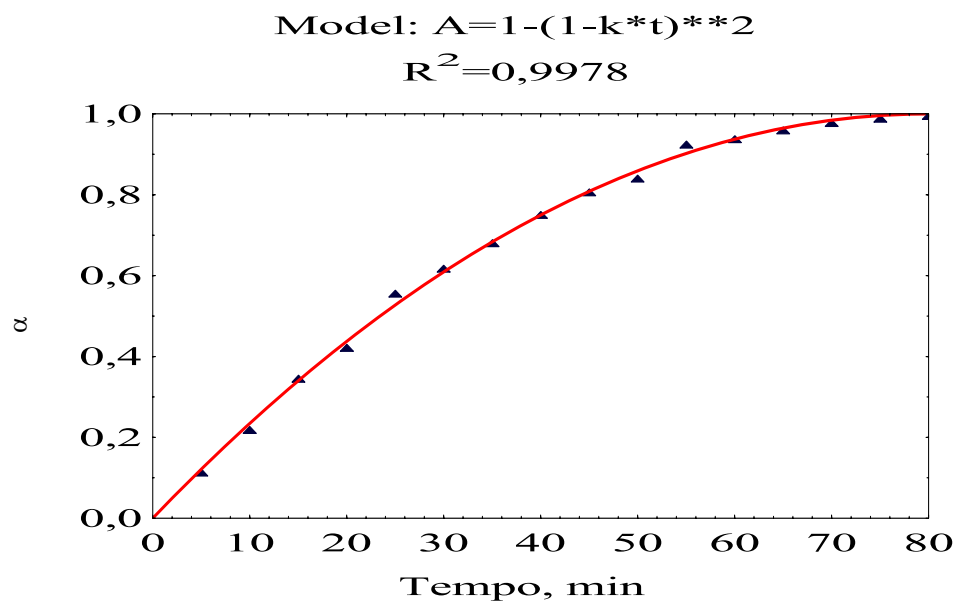


Figura 4.17 – Avanço da interface Bidimensional

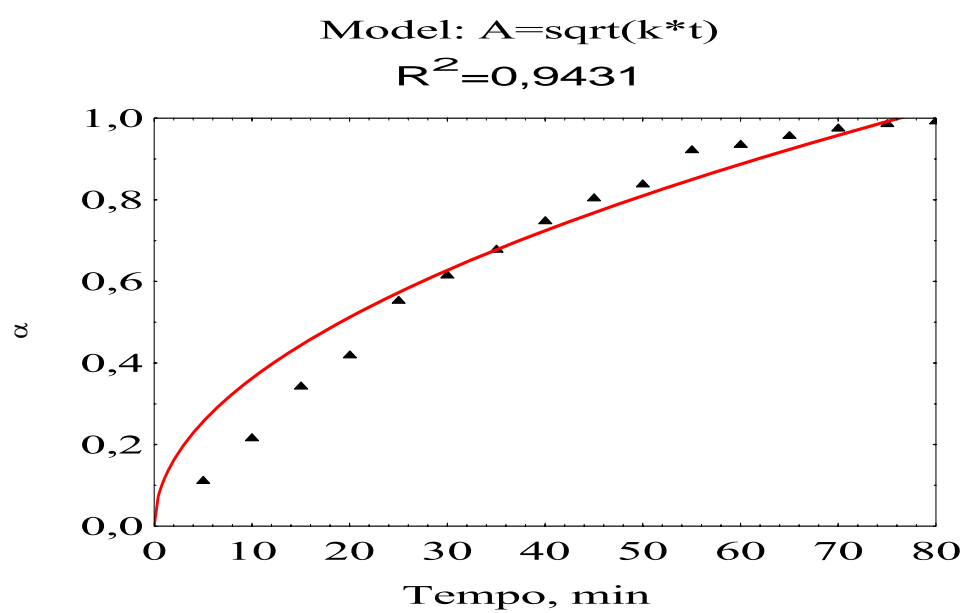


Figura 4.18 – Difusão unidimensional

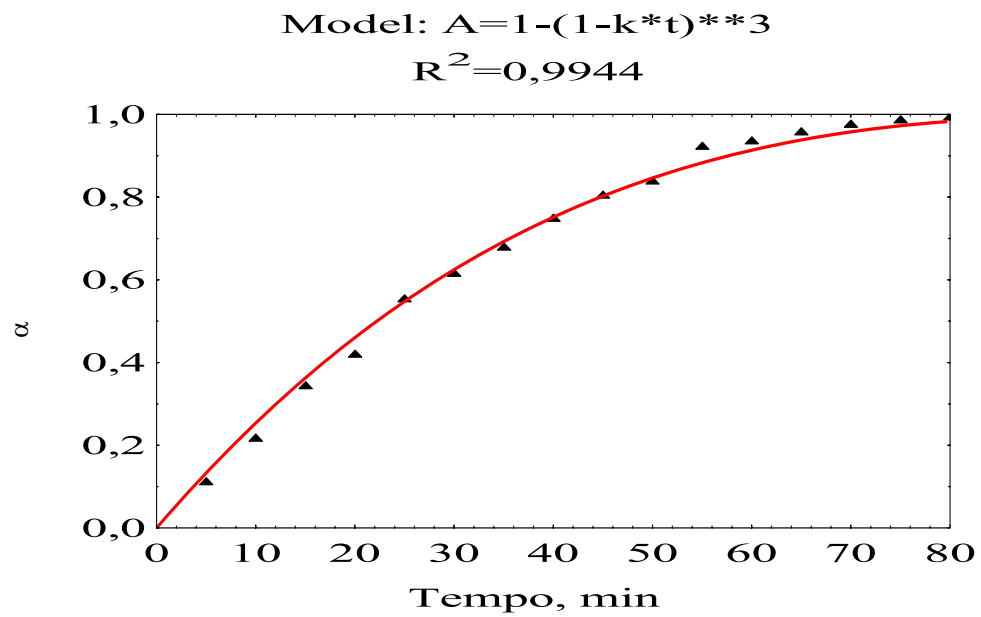


Figura 4.19 – Avanço da Interface Tridimensional

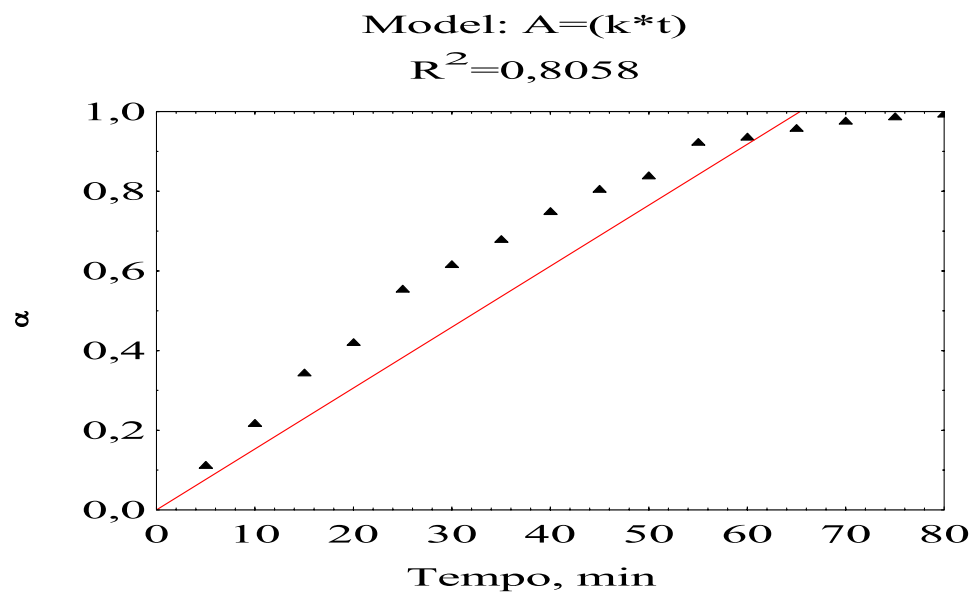


Figura 4.20 – Movimento Unidimensional

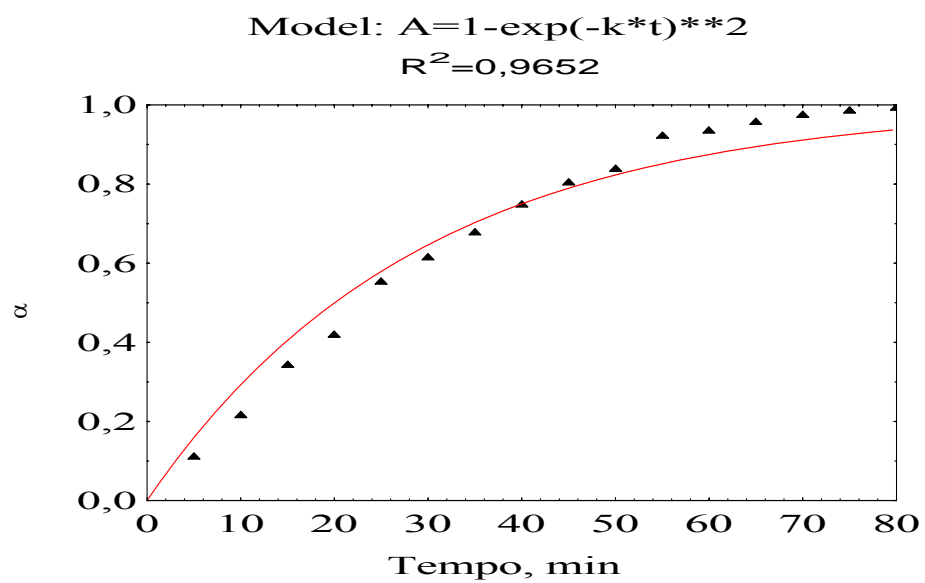


Figura 4.21 – Equação de avrami-eurofe'ev, n=2

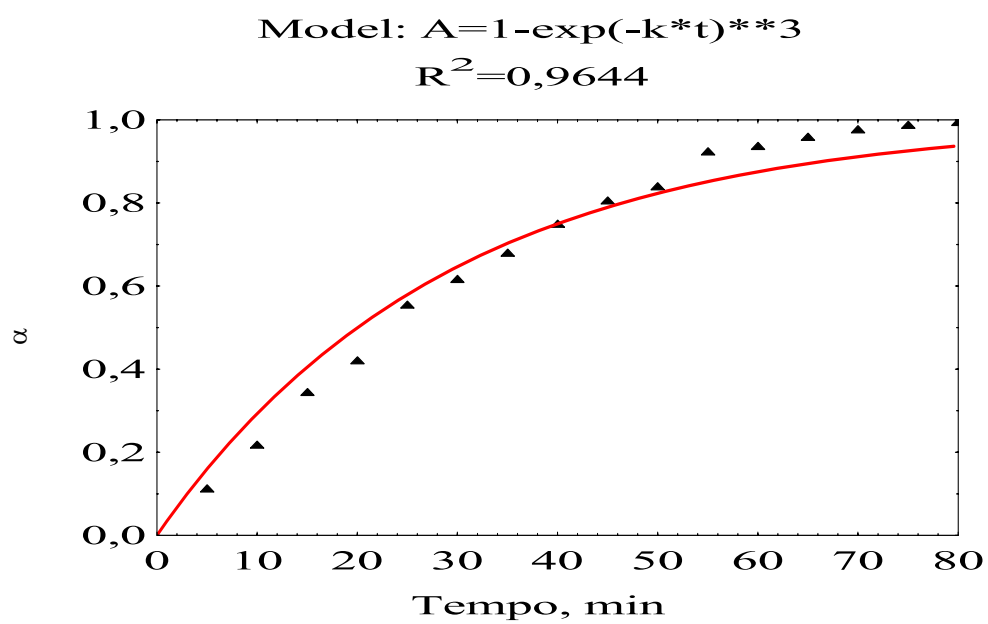


Figura 4.22 – Equação de Avrani-Eurofe'ev, n=3

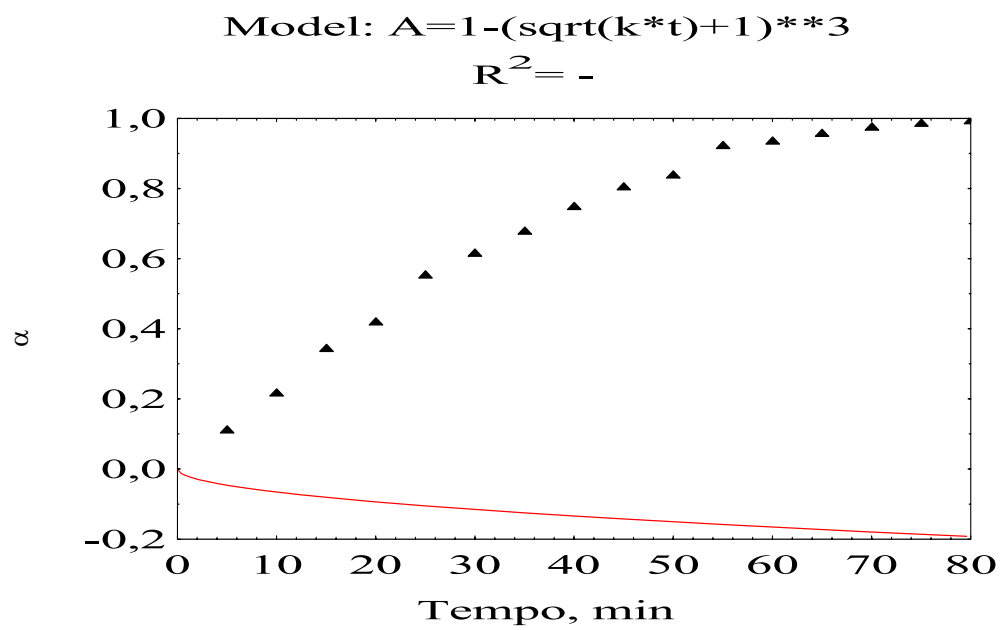


Figura 4.23 – Difusão Tridimensional

Tabela 4.1 – Parâmetros dos ajustes por regressão não linear

Equação	Processo controlador da velocidade de reação	k (min ⁻¹)	Variância explicada R ²
$\alpha = \sqrt{kt}$	Difusão unidimensional	0,01313	0,9431
$\alpha = 1 - (\sqrt{kt} + 1)^3$	Difusão Tridimensional	0,0005	–
$\alpha = 1 - (1 - kt)^2$	Avanço da interface bidimensional	0,0125	0,9978
$\alpha = 1 - (1 - kt)^3$	Avanço da interface tridimensional	0,0093	0,9944
$\alpha = kt$	Movimento unidimensional	0,1530	0,8058
$\alpha = 1 - e^{-kt}$	Equação de 1ª ordem	0,0348	0,9652
$\alpha = 1 - e^{-k^2 t^2}$	Nucleação aleatória e posterior crescimento, eq. de Avrami-Eurofe'ev, n=2	0,1735	0,9652
$\alpha = 1 - e^{-k^3 t^3}$	Nucleação aleatória e posterior crescimento, eq. de Avrami-Eurofe'ev, n=3	0,1155	0,9644

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 Conclusões

De acordo com as análises teórico-experimentais realizadas, podemos concluir que:

- o estudo da influência da granulometria sobre a natureza da etapa limitante do processo global de desidratação da gipsita, para produção de gesso, mostrou que, em condições operacionais de temperatura de 170°C e pressão manométrica de 0,65 atm, o regime químico se torna à etapa controladora para diâmetros de partículas menores que 220 μm . Acima deste valor, predomina o regime de difusão intraparticular;
- o gesso obtido em condições favoráveis ao controle de parâmetros operacionais como temperatura ($T=170^\circ\text{C}$) e pressão manométrica (0,65atm) apresentaram cristais bem formados, os quais justificam para esse tipo de semi-hidrato uma maior resistência mecânica;
- as micrografias obtidas por meio de microscopia eletrônica de varredura, com um fator de ampliação de 3700 vezes, comprovaram as condições básicas adequadas para a produção de um gesso beta dentro de especificações requeridas pelas normas de qualidade da ABNT, ou seja, uma temperatura de 170°C e pressão manométrica de 0,65atm;m
- a análise da variância (ANOVA), mostrou que os modelos matemáticos relativos aos mecanismos de avanço das interfaces bi- e tridimensional são os que mais se ajustaram aos dados experimentais.
- os mecanismos de avanço da interface di- e tridimensional podem ser utilizados para explicarem a cinética da reação de desidratação do minério de gipsita, na obtenção de um gesso beta reciclável.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Dentre os principais trabalhos necessários para dar seqüência a esta pesquisa, pode-se sugerir:

- Estudo da gipsita de outras naturezas, avaliando o efeito a impurezas existentes no dihidrato;
- Aplicação das condições otimizadas de $T = 170^{\circ}\text{C}$ e $P = 0,65 \text{ atm}$ em fornos de calcinação piloto e avaliar as propriedades do gesso obtido; e
- Estudo do ciclo de vida para o gesso obtido a $T = 170^{\circ}\text{C}$ e $P = 0,65 \text{ atm}$ manométrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

ALVES, Carlos Eduardo T., QUELHAS, Osvaldo L.G., **A Ecoeficiência e o Ecodesign na indústria da construção civil. Uma abordagem a prática do desenvolvimento sustentável na gestão de resíduos com uma visão de negócios**. Latec/UFF, 2004.

ANTUNES, R. JOHN,V, **Conceito de tempo útil das pastas de gesso**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, PCC, São Paulo, 2000.

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

BASTOS, F. F.; BALTAR, C. A. M., Avaliação dos processos de calcinação para produção de gesso Beta. **In XLIII Congresso Brasileiro de Química**. Anais do Congresso. Minas Gerais, 2003.

BENACHOUR, M.; PERES, L. S.; SANTOS, V. A. **Gesso: aplicação na construção civil**. Recife: Editora Bagaço, 2001. 135 p.

BERNSTEIN, H. Bridging the globe: creating an international climate and challenges of sustainable design and construction. **Industry and Environment**. Paris: UNEP IE, v. 29 n°2 April-June 1996.

BOLDYREV, V. V., Reactivity of solids, **Journal of Thermal Analysis**, 40 1041-1062, 1993.

CAMPBELL, Steve **Lead by Example** Walls and Cieling.

www.wconline.com/CDA/ArticleInformation/features_BNP_featuresItem/03299,93761,00.htm

1. Acessado em 14/04/2007.

CARDIM, Arnaldo; OLIVEIR, Maria Antonieta. **Resíduo da construção e demolição**, Recife, 2003.

CARTER, R. E., Kinetic model for solid-state reactions, **J. Chem. Phys.**, 34 (6), 2010-1961, 1961.

CARVALHO, Michele T. M., TUBINO Rejane M., **Estudo do reaproveitamento dos resíduos do gesso na confecção de tijolos e suas aplicações na construção civil do Estado de Goiás**, IBRACON, São Paulo, 2003.

CASPAR, J.; DANY, C.; AMATHIEU, L.; REINAUT, P.; FANTOZZI, G. **Influence of the Microstructure of set Plaster on its Mechanical Properties**. Versailles: Euro gypsum – XXI Congress, 1996.

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

CIWMB (California Integrated Waste Management Board) **Drywall Recycling**. <http://www.ciwmb.ca.gov/ConDemo/factsheets/Drywall.htm#Economics> – Acessado em: 21/05/2007.

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

DEGANI, Clarice Menezes. **Estudo da Aplicabilidade de Sistema de Gestão Ambiental em Empresas Construtoras de Edifícios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

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

DAREN, J.; HARBER, J.; PAMPUCH, R., **Solid-state chemistry**, vol. II Crakow, 1972.

FOLLNER, S. et al., **The Settings Behavior of Beta- and Alpha- $\text{CaSO}_4 \times 0,5 \text{ H}_2\text{O}$ as Function of Crystal Structure and Morphology**. Cryst. Res. Technol, Vol. 37, Nº 10, 10075-1087, 2002.

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

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

GRIGOLI, Ademir Scobin. **Entulho de obra – reciclagem e consumo na própria obra que o gerou**. Paraná: PCC – USP, 2000.

GUINÉE, J.B; HAES, H.A.U.; HUPPES, G. **Quantitative life cycle assessment of products: goal definition and inventory**. Journal of Cleaner Production, 1993.

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

HOLD, B. J.; CUTLER, I. B.; WADSWORTH, M. E., Rate of thermal dehydration of kaolinite in vacuum, **J. Am. Cream. Soc.**, 45 (3), 133-136, 1962.

ITEC - INSTITUT DE TECNOLOGIA DE LA CONSTRUCCIÓ DE CATALUNYA. **Guía d'aplicación del Decreto 201/1994**, regulador deis henderos i altares residuos de la construcció. Departamento de Medi Ambienta, Junta de Resius. Março de 1995.

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

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. São Paulo: USP, Escola Politécnica, 2000. 102p

JOHN, V. M. **Desenvolvimento sustentável, construção civil, reciclagem e trabalho multidisciplinar**. Texto Técnico. Disponível em:
http://www.reciclagem.pcc.usp.br/des_sustentavel.htm. Acessado em 10 de julho de 2007.

JOHN, V.M.; CAVALCANTE, J.R. Conclusões. In: **Workshop reciclagem de resíduos como materiais de construção civil**. São Paulo: ANTAC, 1996.

JOHN, V. M. J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: **Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil**, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, IBRACON, 1999. p.44-55.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

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

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo: USP, Escola Politécnica, 1997. 147p.

LEVY, S.M. **Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassas e concretos**. São Paulo, 1997. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LEITÃO, Elenara. **Equipamento móvel de recuperação urbana, Núcleo de Pesquisa em Meio Ambiente e Urbanismo Synapsis**.

<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/bases/texto173.asp> 2004.

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

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

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

MORENO, H. O foco ambientalista da construção civil. In: **Seminário Materiais & Design – Interface no desenvolvimento do produto**. Anais. São Carlos, 1998. FIESP, UFSCAR, SEBRAE. 1998. p.174-182.

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

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

PINTO, T.P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. 189p.

PINTO, T. P. **Entulho de construção: problema urbano que pode gerar soluções.** A Construção – São Paulo, n. ° 2325, 1992, p 11-12.

PINTO, T.P. **Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil.** Situação atual. In: reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção civil (Workshop), São Paulo. Anais. São Paulo, EPUSP/ANTAC, 1997. p.156-170.

RIBEIRO, A. S., Produção de Gesso Reciclado a Partir de Resíduos Oriundos da Construção Civil. **Dissertação de Mestrado.** Programa de Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba. 2006. 105 p.

ROSE, G. M., **Chemical reactor design in practice**, Elsevier Co., New York, 1981.

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

SANTOS, V. A., VASCONCELOS, E. C., PINTO, F. G., Determinação do Teor de Semi-hidrato em Gessos a partir de Variação na Temperatura de Re-hidratação In: IV Encontro Nacional de Gipsita, 1997, Recife. **IV Encontro Nacional de Gipsita.** Recife: Universitária - UFPE, 1997. v.1.55 – 60 p.

SANTOS, J.A.P. Cinética do processo de reforma catalítica do metano com dióxido de carbono. Aplicação à modelagem e simulação da operação em reator de leito fluidizado. **Dissertação de Mestrado/UFPE**, 2004.

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

SCHMAL, M., **Cinética homogênea aplicada e cálculos de reatores**, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.

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

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

SOLYMOSI, F., TOLMACSOV, P., ZAKAR, T.S. Dry reforming of propane over supported Re catalyst. **Journal of Catalysis** **233** (2005) 51-59.

SOLYMOSI, F., TOLMACSOV, P., KEDVES, K. CO₂ reforming of propane over supported Rh. **Journal of Catalysis** **216** (2003) 377-385.

SOLYMOSI, F., SZÖKE, A., OVÁRI, L. **Decomposition of Ethane and Its Reaction with CO₂ over Rh/ZSM-5 Catalyst**. **Journal of Catalysis** **186** (1999) 269-278.

SOUTO, R.T. Modelagem e validação experimental do processo de reforma do metano com dióxido de carbono em reator de leito fixo. **Dissertação de Mestrado/UFPE**, 2005.

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

SZEKELY, J.; EVANS, J. J.; SOHN, H. Y., **Gas-solid reactions**, Academic Press, New York, 1976.

TAKENAKA, S., OGIHARA, H., YAMANAKA, I., OTSUKAI, K. **Decomposition of methane over supported-Ni catalysts: effects of the supports on the catalytic lifetime.** *Applied Catalysis A: General* 217-(2001) 101-110.

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

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

WANG, H.Y., RUCKENSTEIN, E. **Carbon dioxide reforming of methane to synthesis gas over supported rhodium catalysts: the effect of support.** *Applied Catalysis A: General* 204 (2000) 143-152.

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

XENOPHON, E.V. Catalytic dry reforming of natural gas for the production of chemicals and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 28 (2003) 1045-1063.

YAN, Q.G., WENG, W.Z., WAN, H.L., TOGHIANI, H., TOGHIANI, R.K., PITTMAN Jr., C. U. **Activation of methane to syngas over a Ni/TiO₂ catalyst.** *Applied Catalysis A: General* 239(2003) 43-58.

ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas: Editora da UNICAMP, 1997. 140p.

ZORDAN, S. E.; PAULON, V. A. **A utilização do entulho como agregado para o concreto.** Texto técnico. Disponível em: < http://www.reciclagem.pcc.usp.br/a_utilizacao_entulho.htm > Acesso em 05 de maio de 2007.

ZORDAN, S. E. **Entulho da indústria da construção civil**. Texto técnico. Disponível em: <
http://www.reciclagem.pcc.usp.br/entulho_ind_ccivil.htm> Acesso em 28 de maio de 2007.

ANEXOS

ANEXO 01

clear

% Programa "tgfrgn1" para cálculo do teor de semi-hidrato

% DADOS PRELIMINARES:

MSO3=80;	% peso molecular do SO3
100	100
90	90
80	80
70	70
60	60
50	50
40	40
30	30
20	20
10	10
0	0

MCaO=56; % peso molecular do CaO

MCaSO4=136; % peso molecular do CaSO4

MSemi=145; **% peso molecular do semi-hidrato $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$**

MGip=172; % peso molecular da gipsita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

MMgO=40; % peso molecular do MgO

MC02=44; % peso molecular do CO2

MH₂O=18; **% peso molecular da H₂O**

% DADOS DE LABORATÓRIO SOBRE A GIPSITA

GAc=20.02; % input('Entre com o valor de água combinada na gipsita :');

GSO3=46.00; % input('Entre com o valor de SO3 na gipsita :');

GCaO=32.67; % input('Entre com o valor CaO na gipsita : ');

GC02=0.92; % input('Entre com o valor de CO2 na gipsita : ');

GMgO=0.06; % input('Entre com o valor de MgO na gipsita : ');

GAI=0.0014; % input('Entre com o valor de água livre na gipsita : ');

```
%n=input('Entre com o valor do numero de pontos "Conversao versus Agua de  
cristalizaçao no gesso" : ');
```

%

% INICIALIZANDO OS CÁLCULOS

```
% for i=1:n;
```

% Cálculo do fator de conversão dos teores no gesso em função

% da composição da gipsita:

```
% E=input('Entre com o valor da imprecisão máxima das análises de laboratório, % : ');
```

Aca=input('Entre com o valor de água combinada no gesso (laboratório) : ');

% Estimativa do teor mínimo de água no gesso para obtenção da conversão máxima

```

Acmin=(GAc*(.9999-1)+Aca)/.9999;
% f=(100*(GAc-Acmin))/(100-Acmin);
f1=100/(100-(GAc-Aca));
% Cálculo da composição do gesso:
SO3=f1*GSO3; CaO=f1*GCaO; CO2=f1*GCO2; MgO=f1*GMgO;
Ac=f1*GAc; Al=f1*GAl;
% Imprecisão máxima das análises
% E1=1-(E/100); E2=1+(E/100);
% Cálculo do Cao disponível:
CaOd=CaO-(1.27*(CO2-(1.1*MgO)));
% Verificar excesso de CaO ou SO3:
CaOd1=CaOd/SO3;
% CaOd2=CaOd*E2/SO3;
R1=1; R2=1; R3=1; R4=1; R5=1; R6=1; R7=1; R8=1; R9=1;
while(R1 & R2 & R3 & R4 & R5 & R6 & R7 & R8 & R9)
    if (CaOd1<MCaO/MSO3)
        % SO3 combinado e em excesso
        SO3c=(SO3/CaO)*CaOd; SO3e=SO3-SO3c;
        % Teor de CaSO4
        CaSO4=CaOd+SO3c;
        % Verificar se existe semi-hidrato, anidrita ou di-hidrato:
        % CaOd11=CaSO4/Acmin; CaOd21=CaOd2*E2/Acmin;
        if (CaOd1<(MCaSO4/(.5*MH2O)))
            % Cálculos dos teores de di-hidrato e semi-hidrato
            D=6.37*Aca-1.025*CaOd; H=16.1*Aca-3.37*D; A=0;
            % Cálculo da conversão
            % y(i)=(H*100)/(Acmin/.0621);
            y=(H*100)/(Acmin/.0621);
            R1=0;
        elseif (CaOd1>(MCaSO4/(.5*MH2O)))
            % Cálculos dos teores de anidrita e semi-hidrato

```

```

A=(2.43*CaOd)-(15.1*Acmin); H=16.1*Acmin; D=0;
% Cálculo da conversão
% y(i)=(H*100)/(Acmin/.0621);
y=(H*100)/(Acmin/.0621);
R2=0;
else
% Cálculo do teor de semi-hidrato
H=Acmin+CaSO4; D=0; A=0;
% Cálculo da conversão
%y(i)=(H*100)/(Acmin/.0621);
y=(H*100)/(Acmin/.0621);
R3=0;
end
elseif (CaOd1>(MCaO/MSO3))
% Cálculo de CaO disponível e em excesso
CaOc=.7*SO3; CaOe=CaOd-CaOc;
% Cálculo do teor de CaSO4
CaSO4=CaOc+SO3;
% Verificar a existência de Semi-hidrato, anidrita ou di-hidrato:
CaOd11=CaSO4*E1/Acmin; CaOd21=CaOd2*E2/Acmin;
if (CaOd11<(MCaSO4/(.5*MH2O)))
%Cálculos dos teores de di-hidrato e semi-hidrato
D=((15.1*Acmin)-CaSO4)/2.37; H=(16.1*Acmin)-(3.37*D); A=0;
% Cálculo da conversão
% y(i)=(H*100)/(Acmin/.0621);
y=(H*100)/(Acmin/.0621);
R4=0;
elseif (CaOd1>(MCaSO4/(.5*MH2O)))
% Calcule os teores de anidrita e semi-hidrato
A=CaSO4-(15.1*Acmin); H=16.1*Acmin; D=0;
% Cálculo da conversão

```

```

    %  $y(i) = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
     $y = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
    R5=0;
else
    % Calcule o teor de Semi-hidrato
     $H = CaSO4 + Acmin$ ; D=0; A=0;
    % Cálculo da conversão
     $y = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
    %  $y(i) = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
    R6=0;
end
else
     $CaSO4 = CaOd + SO3$ ;
    % Verificar a existência de semi-hidrato, anidrita ou di-hidrato:
    %  $CaOd11 = CaSO4 * E1 / Acmin$ ;  $CaOd21 = CaSO4 * E2 / Acmin$ ;
    if ( $CaOd1 < (MCaSO4 / (.5 * MH2O))$ )
        % Cálculos dos teores de di-hidrato e semi-hidrato
         $D = ((15.1 * Acmin) - CaSO4) / 2.37$ ;  $H = (16.1 * Acmin) - (3.37 * D)$ ; A=0;
        % Cálculo da conversão
        %  $y(i) = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
         $y = (H * 100) / (Acmin / .0621)$ ;
        R7=0;
    elseif ( $CaOd1 > (MCaSO4 / (.5 * MH2O))$ )
        % Cálculos dos teores de anidrita e Semi-hidrato
         $A = CaSO4 - (15.1 * Acmin)$ ;  $H = 16.1 * Acmin$ ; D=0;
        % Cálculo da conversão
         $y = ((GAc - Acmin) - (Aca - Acmin)) / (GAc - Acmin)$ ;
        %  $y(i) = ((GAc - Acmin) - (Aca - Acmin)) / (GAc - Acmin)$ ;
        R8=0;
    else
        % Cálculo do teor de semi-hidrato

```



```

H=CaSO4+Acmin; D=0; A=0;
% Cálculo da conversão
% y(i)=(H*100)/(Acmin/.0621);
y=(H*100)/(Acmin/.0621);
R9=0;
end
end
% x(i)=Aca;
x=Aca;
end
% RESULTADOS
disp(['Teor de Semi-hidrato (%) = ' num2str(100-(abs(D))))]
disp(['Teor de Anidrita (%) = ' num2str(A)])
disp(['Teor de Di-hidrato (%) = ' num2str(abs(D))])
% disp(['Conversão à saída do forno (%) = ' num2str(y)])
% end
% plot(x,y,'k^')
% title('Conversão em função da água combinada no gesso')
% xlabel('Chemically combined water, %')
% ylabel('Conversion of gypsum, %')

```

ANEXO 02

Ensaio: 01

Tabela 1 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 2h à 250°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial - final) (g)	%
04	10	9,955	0,045	4,5
09	10	9,953	0,047	4,7
14	10	9,951	0,049	4,9
28	10	9,946	0,054	5,4
35	10	9,944	0,056	5,6
48	10	9,941	0,059	5,9
65	10	9,939	0,061	6,1

Ensaio: 02

Tabela 2 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 3h à 250°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial - final) (g)	%
04	10	9,954	0,046	4,6
09	10	9,953	0,047	4,7
14	10	9,949	0,051	5,1
28	10	9,947	0,053	5,3
35	10	9,946	0,054	5,4
48	10	9,943	0,057	5,7
65	10	9,941	0,059	5,9

Ensaio: 03

Tabela 3 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 3h à 230°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial - final) (g)	%
04	10	9,955	0,045	4,5
09	10	9,952	0,048	4,8
14	10	9,951	0,049	4,9
28	10	9,948	0,052	5,2
35	10	9,955	0,055	5,5
48	10	9,943	0,057	5,7
5	10	9,941	0,059	5,9

Ensaio: 04

Tabela 4 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 1,25h (uma hora e quinze minutos) à 160°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial - final) (g)	%
04	10	8,913	1,087	10,87
09	10	8,846	1,154	11,54
14	10	8,798	1,202	12,02
28	10	8,683	1,317	13,17
35	10	8,593	1,407	14,07
48	10	8,549	1,451	14,51
65	10	8,533	1,467	14,67

Ensaio: 05

Tabela 5 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 1,25h (uma hora e quinze minutos) à 150°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial – final) (g)	%
04	10	8,973	1,027	10,27
09	10	8,835	1,165	11,65
14	10	8,786	1,214	12,41
28	10	8,662	1,338	13,38
35	10	8,571	1,429	14,29
48	10	8,553	1,447	14,47
65	10	8,529	1,471	14,71

Ensaio: 06

Tabela 6 - valores médios da conversão da gipsita em função da granulometria no intervalo de tempo de 1,25h (uma hora e quinze minutos) à 150°C

Tyler/Mesh	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Peso (inicial - final) (g)	%
04	10	8,897	1,103	11,03
09	10	8,856	1,144	11,44
14	10	8,794	1,206	12,06
28	10	8,637	1,363	13,63
35	10	8,577	1,423	14,23
48	10	8,540	1,460	14,60
65	10	8,521	1,479	14,79